

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

Tiago Liberalesso

**TELHADOS VERDES EXTENSIVOS: INFLUÊNCIA DA
COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NA RETENÇÃO HÍDRICA E NO
DESENVOLVIMENTO DA VEGETAÇÃO**

Santa Maria, RS, Brasil

2018

Tiago Liberalesso

**TELHADOS VERDES EXTENSIVOS: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO
SUBSTRATO NA RETENÇÃO HÍDRICA E NO DESENVOLVIMENTO DA
VEGETAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Rutineia Tassi

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Ester Ceconi

Santa Maria, RS, Brasil

2018

LIBERALESSO, TIAGO

TELHADOS VERDES EXTENSIVOS: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NA RETENÇÃO HÍDRICA E NO DESENVOLVIMENTO DA VEGETAÇÃO / TIAGO LIBERALESSO.- 2018.

139 p.; 30 cm

Orientadora: Rutineia TASSI

Coorientadora: Denise Ester CECONI

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, RS, 2018

1. Telhados Verdes 2. Substratos 3. Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto 4. Passivos Ambientais I. TASSI, Rutineia II. CECONI, Denise Ester III. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

© 2018

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Liberalesso. A reprodução de partes ou do todo desta obra só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: thiagoliberalesso@hotmail.com

Tiago Liberalesso

**TELHADOS VERDES EXTENSIVOS: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO
SUBSTRATO NA RETENÇÃO HÍDRICA E NO DESENVOLVIMENTO DA
VEGETAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental.**

Aprovado em 21 de fevereiro de 2018:

Rutineia Tassi, Dr^a. (UFSM)
(Presidente/Orientadora)

Denise Ester Ceconi, Dr^a. (UFSM)
(Coorientadora)

Maria Helena Fermino, Dr^a. (DDPA - SEAPI/RS)
(Examinadora externa)

Maria Cristina de Oliveira Matos Silva, Dr^a. (IST - Lisboa)
(Examinadora externa) - Videoconferência

Santa Maria, RS, Brasil

2018

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), pela estrutura física e intelectual durante toda minha trajetória acadêmica;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PPGEAmb), pela oportunidade de crescimento profissional;

A minha família, meus irmãos Diego e Melânia, meu pai Eli Antônio, e em especial a minha mãe, Maria Margareth, principal responsável pela minha trajetória acadêmica e a quem nutro um enorme orgulho pela pessoa que é, honesta, guerreira e perseverante, a quem devo todas as conquistas que obtive. Ela que me ama incondicionalmente e me aceita como sou, que sempre me encorajou e deu total apoio para que eu pudesse seguir firme diante das adversidades encontradas no caminho, afinal, *“a caneta é mais leve que a enxada”*. Te agradeço por ter me criado para o mundo, me ensinando a ser um homem digno e a lutar pelos meus objetivos. Sou e sempre serei eternamente *grato a te mamma*. Obrigado por tudo, te amo!

A minha orientadora, Professora Rutineia Tassi, pelos saberes compartilhados, pelo exemplo de conduta profissional, e principalmente pelo acolhimento, incentivo e oportunidade de trabalho. Pela relação de amizade construída nesse período e pelas futuras parcerias profissionais que teremos.

A minha coorientadora, Denise Ester Ceconi, pelo empenho e dedicação para com este trabalho, e principalmente pelo auxílio intelectual e psicológico despendido durante esse período.

Ao professor Enio Júnior Seidel, sempre solícito e paciente, pelo apoio estatístico prestado durante essa fase de conclusão e interpretação dos resultados;

Aos meus colegas e amigos que de alguma maneira participaram dessa trajetória, em especial à Ana Lúcia da Rosa, Bruno Martins, Calina Barros, Carilo Marzari, Claudia Costella, Fernanda Tamiozzo, Geovane Theisen, Gilneia Mello e Nathana Arboit, vocês fizeram meus dias mais leves e também têm parte nesta conquista;

À Renata Celante e aos demais bolsistas e voluntários que contribuíram para a conclusão desta pesquisa;

À Rosa Maria M. de Brito e à Luciane C. Iop por todo auxílio oferecido durante esse período;

À CAPES, pelo auxílio financeiro concedido;

À banca avaliadora pela disponibilidade e colaboração no aperfeiçoamento deste trabalho;

Enfim, a todos que de uma forma ou outra contribuíram para que esta etapa fosse concluída com sucesso.

Meu muito obrigado!

“Homo sum: nihil humani a me alienum puto”.

(Publius Terentius Afer)

RESUMO

TELHADOS VERDES EXTENSIVOS: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DO SUBSTRATO NA RETENÇÃO HÍDRICA E NO DESENVOLVIMENTO DA VEGETAÇÃO

AUTOR: Tiago Liberalesso
ORIENTADORA: Rutineia Tassi
COORIENTADORA: Denise Ester Ceconi

O aumento das superfícies impermeáveis ocasionado pelo processo de urbanização, aliado à falta de planejamento das diversas infraestruturas necessárias à drenagem urbana, favorecem a degradação ambiental e, por consequência, a qualidade de vida da população. Frente a isso, surge o conceito de desenvolvimento urbano de baixo impacto com o intuito de minimizar os diversos infortúnios decorrentes de tal processo. Dentre as diversas técnicas de baixo impacto, os telhados verdes mostram-se como uma alternativa capaz de contribuir para à redução do escoamento superficial, diminuir o efeito de ilhas de calor, melhorar a estética local e aumentar a biodiversidade nos centros urbanos. Das diversas componentes de um telhado verde, o meio de crescimento (substrato) é parte fundamental na concepção do sistema, sendo responsável pela retenção dos eventos de chuva e a consequente amortização do pico de escoamento, além de servir como suporte para o desenvolvimento e manutenção da vegetação. Nesse sentido, a formulação de um substrato a partir de passivos ambientais vem a corroborar para a melhoria da qualidade ambiental, bem como, diminuir os custos de produção e aumentar a sustentabilidade dos telhados verdes. Diante disso, esta pesquisa objetivou desenvolver um substrato para uso em telhados verdes extensivos, utilizando como matéria-prima resíduos da atividade rizícola e da construção civil. Foram empregados restos de argamassa, tijolos triturados e casca de arroz (*in natura* - CAN e carbonizada - CAC) em diferentes proporções volumétricas para a composição das misturas, além de solo, vermicomposto e vermiculita. Foram avaliadas as características físicas e químicas de cada mistura, bem como a eficácia na retenção do escoamento pluvial, além da qualidade da água escoada e o desempenho da vegetação submetida aos diferentes substratos. Verificou-se que, as composições com maiores proporções de casca de arroz carbonizada, obtiveram os melhores resultados para os atributos físicos desejáveis, reduzindo a densidade das misturas e, conseqüentemente, a carga sobre a estrutura predial. As composições SC4 (20% de CAC, 30% solo, 15% vermicomposto, 15% vermiculita e 20% resíduo da construção civil) e SCOM (substrato comercial à base de turfa), apresentaram o melhor desempenho quanto à capacidade de retenção do escoamento pluvial, retendo, respectivamente, 79,76% e 85,27% do volume de chuva precipitado durante o período de monitoramento. Quanto à cobertura vegetal (*Sedum rupestre*), estas composições apresentaram um desempenho satisfatório, em comparação com as demais analisadas, sendo que, o desenvolvimento da vegetação foi inferior nas composições que continham casca de arroz *in natura*. Todos os substratos estudados alteraram negativamente a qualidade da água, aumentando o teor de sólidos e fósforo presentes nas amostras. Em síntese, verificou-se que a obtenção de uma composição que atenda a múltiplas características desejáveis para um substrato utilizado em telhados verdes é, por vezes, de difícil elaboração. Desta forma, deve-se priorizar a utilização de um substrato que atenda àquelas características consideradas mais importantes para o propósito pretendido, e que ao mesmo tempo proporcione a implantação de um sistema duradouro e autossustentável.

Palavras-chave: Coberturas verdes, meio de crescimento, passivos ambientais, desenvolvimento urbano de baixo impacto.

ABSTRACT

EXTENSIVE GREEN ROOFS: THE INFLUENCE OF SUBSTRATE COMPOSITION ON THE WATER RETENTION AND VEGETATION DEVELOPMENT

AUTHOR: Tiago Liberalesso
ADVISOR: Rutineia Tassi
CO-ADVISOR: Denise Ester Ceconi

The increasing of the impermeable surfaces caused by urbanization process, allied with the lack of planning of infrastructures facilities, have contributed to environmental degradation and consequently reducing life quality in urban centers. In this light, green roofs are emerging as good option for reducing these negative impacts by improving stormwater management, reducing the runoff, mitigating the urban heat island effects, increasing urban biodiversity and providing a more aesthetically pleasing and healthy environment. Of all the green roof's system, the growing media (substrate) is the essential part in the design and success of the system. The substrate developed from environmental liabilities provides the improvement of environmental quality as well as lowering production costs, increasing the green roofs sustainability. In that context, some substrate compositions were developed for application on extensive green roofs, using civil construction waste and residues from rice production as raw materials. Crushed bricks (fixed proportion of 20%), rice husk (natural - CAN and carbonized - CAC), soil in different volumetric proportions, vermicompost and vermiculite (fixed proportions of 15% each) were used in these compositions. Physical and chemical properties of each substrate, the runoff water quality and the vegetation development set to the different treatments were evaluated. The composition with higher content of carbonized rice husk showed the most desirable physical attributes, reducing the density of the substrates and, consequently, the load on the building's structure. The treatments SC4 (20% CAC and 30% soil) and SCOM (commercial substrate of peat) showed a better retention capacity, retaining respectively 79.76% and 85.27% of the volume of precipitation, during the monitoring period. Treatments with natural rice husk showed the lowest vegetation cover rate. All substrates affected negatively the water quality, increasing the content of solids and phosphorus. As the main findings of this study, it was concluded therefore that it is very difficult to set a single composition that meets all the 'desirable' characteristics of a green roof substrate. Therefore, deeper researches must be carried out to advance in the study of the best composition of substrates for green roofs systems.

Keywords: Green roofs, growth medium, environmental liabilities, low-impact urban development.

RIASSUNTO

VERDE PENSILE ESTENSIVO: INFLUENZA DELLA COMPOSIZIONE DEL SUBSTRATO SULLA RITENTAZIONE DELL'ACQUA E LO SVILUPPO DELLA VEGETAZIONE

AUTORE: Tiago Liberalesso
RELATRICE: Rutineia Tassi
CORRELATRICE: Denise Ester Ceconi

L'aumento delle superficie impermeabile causato dal processo di urbanizzazione, insieme all'assenza di pianificazione delle diverse infrastrutture necessarie allo sviluppo urbano, favoriscono i processi di degradazione ambientale e come conseguenza un peggioramento della qualità della vita della popolazione urbana. Per questo motivo nasce il concetto di sviluppo urbano a basso impatto, con il proposito di ridurre i diversi danni causati dall'urbanizzazione. Fra le diverse tecniche a basso impatto, i tetti verdi si presentano come un'alternativa per ridurre il deflusso superficiale, diminuendo l'effetto delle isole di calore, migliorando l'estetica del luogo e aumentando la biodiversità urbana. Dalle diverse componenti del sistema verde pensile, il substrato è parte fondamentale per lo sviluppo della vegetazione e per la raccolta dell'acqua piovana. In questo modo, la creazione di un substrato che utilizza passivi ambientali, contribuisce al miglioramento della qualità ambientale ed anche alla riduzione dei costi di produzione e all'aumento della sostenibilità dei tetti verdi. Alla luce di questo, la presente ricerca ha come obiettivo lo sviluppo di un substrato nel sistema a verde pensile estensivo, attraverso l'utilizzo di materie prime provenienti dalle costruzioni civili e dalla risicoltura. Sono stati utilizzati buccia di riso (naturale – CAN e carbonizzata – CAC) e suolo in differenti proporzioni, come anche, mattoni tagliuzzati, vermicomposto e vermiculita in proporzioni fisse. Sono state analizzate sia le caratteristiche fisiche e chimiche, sia l'efficacia nella riduzione del deflusso superficiale attraverso la capacità della raccolta dell'acqua di ogni substrato e inoltre la qualità del percolato e la performance della vegetazione inserita nei diversi substrati. Si è osservato che le composizioni con maggior proporzione di bucce di riso carbonizzate hanno avuto i migliori risultati riguardo alle proprietà fisiche desiderabile, riducendo la densità e per conseguenza, il peso sulla struttura. I substrati SC4 (20% CAC, 30% suolo) e SCOM (substrato commerciale a base di torba), hanno presentato il miglior comportamento riguardo alla capacità di ritenzione dell'acqua, trattenendo, rispettivamente, 79,76% e 85,27% del volume di pioggia precipitato durante il periodo di monitoraggio. Quanto al tasso di copertura vegetale, questi due substrati hanno presentato una performance soddisfacente in comparazione con altre composizioni di substrati. La performance della vegetazione è stata inferiore nei substrati che hanno contenuto buccia di riso *in natura*. Tutte le composizioni dei substrati hanno alterato negativamente la qualità dell'acqua, aumentando il contenuto di solidi e fosforo. In sintesi si è osservato che è difficile ottenere un substrato capace di soddisfare tutte le caratteristiche desiderabili per l'utilizzo nel verde pensile, poiché si devono selezionare le caratteristiche considerate più importanti e che forniranno gli elementi essenziali per un sistema longevo ed autosostenibile.

Parole chiave: Verde pensile, sviluppo urbano di basso impatto, rifiuti, passivi ambientali.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores de densidade aparente utilizados em diretrizes internacionais para telhados verdes extensivos.....	38
Tabela 2 - Parâmetros e métodos empregados para as análises da qualidade da água percolada	55
Tabela 3 - Proporções volumétricas utilizadas na formulação dos diferentes substratos testados em laboratório.....	57
Tabela 4 - Teste de comparação de médias para a capacidade de vaso ($\text{dm}^3.\text{dm}^{-3}$) dos diferentes tratamentos - desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV).....	60
Tabela 5 - Teor de água restante nas amostras de substrato ($\text{dm}^3.\text{dm}^{-3}$) ao longo do período de observação - média de três repetições	63
Tabela 6 - Concentração de macronutrientes nos substratos com diferentes proporções volumétricas de casca de arroz (carbonizada e in natura)	79
Tabela 7 - Taxa de cobertura vegetal da <i>Sedum rupestre</i> durante os meses de monitoramento	83
Tabela 8 - Taxa de retenção média para cada evento de chuva durante o período de monitoramento.....	89
Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Spearman para a taxa de retenção, volume de chuva precipitado e período seco antecedente	90
Tabela 10 - Coeficiente de escoamento (c) dos diferentes tratamentos para cada evento de chuva durante o período de monitoramento.....	93
Tabela 11 - Especificações dos eventos monitorados na avaliação da qualidade da água escoada	95

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais tipologias de telhados verdes e suas características	21
Quadro 2 - Tipo de vegetação utilizada de acordo com a profundidade do meio de crescimento	28

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquematização de um telhado verde extensivo de múltiplas camadas	22
Figura 2 - Curva característica da perda de água de um substrato orgânico	36
Figura 3 - Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas na pesquisa	41
Figura 4 – Ilustração das etapas do procedimento de determinação da capacidade de retenção e armazenamento de água dos substratos	45
Figura 5 - Arranjo experimental em DIC com dez tratamentos e quatro repetições	47
Figura 6 - Localização da área experimental e das bancadas do experimento realizado em campo	48
Figura 7 - Especificações da geomembrana MacDrain 2L [®]	49
Figura 8 – Processo de montagem dos módulos experimentais	50
Figura 9 - Sedum rupestre nas fases vegetativa (A) e reprodutiva (B).....	50
Figura 10 - Representação de uma bancada e de um módulo experimental simulando as múltiplas camadas de um telhado verde extensivo.....	51
Figura 11 - Suporte em madeira utilizado para aquisição das imagens fotográficas	52
Figura 12 - Ilustração do layout do programa IMAGEJ [®] para quantificação da taxa de cobertura vegetal através da porcentagem de área coberta.....	53
Figura 13 - Ilustração das diferentes composições de substratos formuladas para uso em telhados verdes extensivos	58
Figura 14 - Capacidade de vaso de cada substrato para 24 h de livre drenagem, pelo teste em colunas de PVC	59
Figura 15 – Teor de água observado em cada composição através do teste em colunas de PVC durante as 24h, 48h, 72h, 96h, 120h e 144 h de livre drenagem	62
Figura 16 - Variação do volume de água perdido e armazenado em cada composição	64
Figura 17 - Porosidade total (%), capacidade de vaso (%), densidade seca e úmida (Kg.m ⁻³) dos diferentes substratos	69
Figura 18 - Sobrecarga à estrutura predial para cada substrato quando em condições de saturação	70
Figura 19 - Capacidade de retenção de água dos substratos formulados a partir de casca de arroz carbonizada - SC (a) e natural – SN (b) sobre tensões de 10 kPa, 50 kPa e 100 kPa.....	73
Figura 20 - Variação do pH dos substratos em função da proporção de casca de arroz	78

LISTA DE FIGURAS - Continuação

Figura 21 - Taxa de cobertura vegetal dos tratamentos durante o período de monitoramento	82
Figura 22- Gráfico comparativo entre as precipitações mensais monitoradas (junho a novembro de 2017) e as precipitações mensais normais (1961 a 1990), em Santa Maria – RS	85
Figura 23 - Retenção média diária dos substratos para período de observação – média de quatro repetições	86
Figura 24 - Retenção mediana dos tratamentos durante o período de monitoramento para cada evento de chuva – mediana de quatro repetições	87
Figura 25 - Concentração de fósforo total (mg.L^{-1}) nas águas de escoamento dos substratos	96
Figura 26 - Valores de turbidez observados nas amostras de água provenientes dos diferentes tratamentos	97
Figura 27 - Valores de cor aparente observados nas amostras de água de escoamento a partir dos diferentes substratos	98
Figura 28 - Potencial hidrogeniônico das águas escoadas a partir dos diferentes tratamentos estudados	99
Figura 29 - Concentrações de sólidos totais presentes nas águas de escoamento de cada tratamento	100
Figura 30 – Variação da concentração de sólidos totais na água de escoamento dos diferentes tratamentos durante o período de estudo	101
Figura 31 – Valores de condutividade elétrica da água escoada a partir dos diferentes tratamentos	102

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A - Propriedades químicas dos substratos formulados para uso em telhados verdes extensivos	119
Apêndice B - Propriedades físicas dos substratos para uso em telhados verdes extensivos – comparação de médias através do teste de Tukey	120
Apêndice C - Propriedades físicas dos substratos para uso em telhados verdes extensivos – Comparação de médias através do teste de Scott-Knott.....	121
Apêndice D - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas	122
Apêndice E - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de camada única.....	125
Apêndice F - Variação da cobertura vegetal dos substratos estudados	128
Apêndice G - Relação entre o volume precipitado e a retenção de água para cada substrato estudado	132
Apêndice H – escoamento mediano dos tratamentos ($\text{dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$) - Teste de Kruskal-Wallis para comparação entre os tratamentos e os eventos de chuva.....	134
Apêndice I - Parâmetros físicos de qualidade da água (sólidos totais, cor aparente e turbidez)	135
Apêndice J - Parâmetros químicos de qualidade da água (pH, condutividade e fósforo total)	136
Apêndice K - Comparação da qualidade da água de escoamento dos substratos em relação a alguns parâmetros de qualidade de água brasileiros.....	137

LISTA DE ABREVIATURAS

AD	Água disponível
AFD	Água facilmente disponível
Al	Alumínio
AR	Água remanescente
AT	Água tamponante
C	Carbono
c	Coefficiente de escoamento
c.c.a.	Centímetros de coluna d'água
Ca	Cálcio
CAC	Casca de arroz carbonizada
CAN	Casca de arroz natural
CE	Condutividade elétrica
CRA _{10,50,100}	Capacidade de retenção de água sob pressão de 10, 50 e 100 kPa
CTC	Capacidade de troca de cátions
DDPA -	Departamento de Diagnóstico e Pesquisa Agropecuária
DS	Densidade seca
DU	Densidade úmida
EA	Espaço de aeração
IST	Instituto Superior Técnico de Lisboa
K	Potássio
kPa	Quilopascal
M.O.	Matéria orgânica
Mg	Magnésio
MO	Matéria orgânica
N	Nitrogênio
P	Fósforo
pH	Potencial hidrogeniônico
PT	Porosidade total
PVC	Policloreto de polivinila
RCC	Resíduo da construção civil
SC	Substrato formulado utilizando-se casca de arroz carbonizada
SCOM	Substrato comercial
SEAPI/RS	Secretário da Agricultura, Pecuária e Irrigação do Rio Grande do Sul
SiO ₂	Sílica
SN	Substrato formulado utilizando-se casca de arroz <i>in natura</i>
TR	Taxa de retenção
UA	Umidade antecedente

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	19
2 REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1 HISTÓRIA, DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES DOS TELHADOS VERDES	20
2.2 TELHADOS VERDES E A GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS	23
2.3 QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA A PARTIR DE TELHADOS VERDES	25
2.4 BIODIVERSIDADE NOS TELHADOS VERDES	26
2.5 ESPÉCIES VEGETAIS PARA TELHADOS VERDES	27
2.6 SUBSTRATO OU MEIO DE CRESCIMENTO EM TELHADOS VERDES	29
2.6.1 Componente orgânica	32
2.6.2 Propriedades físico-químicas e biológicas dos substratos	33
2.6.3 Retenção e armazenamento de água	35
2.7 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL AGREGADO NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 ANÁLISES PRELIMINARES EM LABORATÓRIO	42
3.1.1 Seleção dos materiais	42
3.1.2 Composição dos substratos	43
3.1.3 Teste em colunas	44
3.1.4 Seleção e caracterização dos substratos	45
3.2 AVALIAÇÃO DOS SUBSTRATOS EM CAMPO	47
3.2.1 Desenho experimental, localização e clima	47
3.2.2 Construção dos módulos experimentais	48
3.3 MONITORAMENTO EXPERIMENTAL	51
3.3.1 Cobertura vegetal	51
3.3.2 Capacidade de retenção hídrica	53
3.3.3 Qualidade da água de escoamento	54
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
4.1 COMPOSIÇÃO DOS SUBSTRATOS	57

SUMÁRIO - Continuação

4.2 TESTE EM COLUNAS.....	59
4.2.1 Capacidade de vaso ou capacidade de retenção	59
4.2.2 Retenção e armazenamento de água	61
4.2.3 Síntese.....	67
4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SUBSTRATOS.....	68
4.3.1 Porosidade total.....	68
4.3.2 Densidade.....	70
4.3.3 Teor de água	71
4.3.4 Granulometria.....	74
4.3.5 Síntese.....	75
4.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS SELECIONADOS.....	76
4.4.1 Matéria Orgânica	76
4.4.2 Capacidade de troca de cátions.....	77
4.4.3 Potencial hidrogeniônico	77
4.4.4 Macronutrientes	78
4.4.5 Síntese.....	80
4.5 DESENVOLVIMENTO DA COBERTURA VEGETAL – FASE EM CAMPO.....	81
4.6 CAPACIDADE DE RETENÇÃO E ESCOAMENTO EM CAMPO	84
4.7 QUALIDADE DA ÁGUA DE ESCOAMENTO	94
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	103
6 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	105
7 REFERÊNCIAS	106
APÊNDICES.....	118
ANEXOS	139

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional, aliado ao constante avanço da urbanização, e a substituição de áreas naturais por superfícies impermeáveis resultantes de tal processo, favorecem a degradação ambiental e, por consequência, a qualidade de vida da população.

De acordo com a Organização das Nações Unidas (ONU, 2012), as populações urbanas cresceram de cerca de 750 milhões em 1950 para 3,6 bilhões em 2011. Estimativas apontam que, até o ano de 2050, mais de 70% da população mundial estará vivendo em centros urbanos. Tal crescimento populacional, aliado ao processo de urbanização modifica as condições naturais do ambiente, diminuindo a cobertura vegetal e aumentando a impermeabilização do solo, contribuindo assim, para um desequilíbrio hidrológico capaz de aumentar o volume de escoamento superficial e, por consequência, o aumento das inundações.

Frente a isso, alternativas sustentáveis que visem mitigar os impactos decorrentes do processo de urbanização fazem-se necessárias e imediatas. Neste contexto, surge o conceito de tecnologias de baixo impacto, do inglês LID (*Low-Impact Development*). Segundo a agência norte-americana de proteção ambiental (*United States Environmental Protection Agency*), o conceito de LID refere-se à sistemas e práticas que buscam imitar os processos naturais com o propósito de promover a infiltração, evapotranspiração ou a utilização das águas pluviais, a fim de proteger a sua qualidade e a dos ambientes aquáticos associados (USEPA, 2016).

Os telhados verdes são uma das técnicas de desenvolvimento de baixo impacto, com potencial na redução do escoamento pluvial, diminuindo o efeito de ilhas de calor, melhorando a estética local, proporcionando o isolamento térmico e aumentando a biodiversidade nos centros urbanos (BENGTSSON; GRAHN; OLSSON, 2004), sendo amplamente empregados como alternativa potencial para a remediação dos problemas provenientes do processo de urbanização.

Os telhados verdes são subdivididos em categorias, de acordo com a sua tipologia, que entre outros fatores, está relacionada à profundidade do meio de crescimento. As características do substrato irão limitar o tipo de vegetação inserida e, por consequência, a finalidade de uso do sistema. Sendo assim, o substrato desempenha funções extremamente importantes, pois além de proporcionar um suporte ao desenvolvimento das plantas, determina a resposta do sistema aos eventos de chuva através da interceptação, retenção e armazenamento de água, bem como, interfere na qualidade da mesma (MIRO; SIMS, 2007).

A diretriz alemã para o planejamento, execução e manutenção de telhados verdes (FLL, 2008) determina alguns requisitos para que um substrato possa ser utilizado em tal tecnologia, destacando-se dentre eles, boa estabilidade, elevada capacidade de infiltração, retenção e drenagem, além de um adequado volume de ar, mesmo quando atingir a capacidade máxima de retenção, para garantir a sobrevivência vegetal.

Nesse sentido, o substrato, acaba por ser a principal componente do sistema de armazenamento da água pluvial e, por consequência, é de fundamental importância a compreensão das características inerentes ao mesmo, a fim de potencializar os benefícios ambientais decorrentes da utilização dos telhados verdes.

Outro fator importante, no que tange a qualidade ambiental devido a ações antrópicas, refere-se à destinação alternativa de passivos ambientais decorrentes das atividades humanas, sejam elas agrícolas ou urbanas, mas com potencial de degradação ambiental quando destinados de maneira inadequada. Nesse contexto, o presente trabalho avaliou a utilização de passivos ambientais da rizicultura e da construção civil na composição de diferentes substratos para uso em telhados verdes extensivos, avaliando-se o desempenho hidrológico das misturas, a qualidade da água percolada e o desenvolvimento e manutenção da vegetação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um substrato com características adequadas para uso em telhados verdes extensivos, a partir da utilização de passivos ambientais.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Identificar materiais com potencialidade de uso na composição de substratos para uso em telhados verdes extensivos;
- Determinar as proporções de cada componente, avaliando as características físico-químicas dos substratos;
- Avaliar a capacidade de retenção e armazenamento de água de acordo com a variação volumétrica nas proporções de cada componente;
- Verificar o desempenho da vegetação (*Sedum rupestre*) submetida a diferentes composições de substrato;

- Analisar a qualidade da água de escoamento proveniente dos diferentes substratos;
- Identificar as composições com melhor desempenho relativo.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está organizado sequencialmente em seis grandes itens: introdução, referencial teórico, material e métodos, resultados e discussão, considerações finais, e por fim, as limitações encontradas na realização da pesquisa.

Na Introdução, de maneira sucinta, é exposta a problemática ambiental da urbanização e as alternativas de mitigação aos problemas decorrentes de tal processo. São apresentadas soluções denominadas Tecnologias de Baixo Impacto com enfoque especial aos telhados verdes e ao objeto desta pesquisa, os substratos utilizados na composição desses sistemas.

O Referencial Teórico apresenta a sustentação argumentativa sobre o tema de estudo, relatando e comparando resultados obtidos a partir de trabalhos desenvolvidos por diversos pesquisadores. Alguns temas relevantes para o entendimento dos aspectos fundamentais da pesquisa são descritos com maior riqueza de detalhes, principalmente aqueles relacionados aos substratos utilizados em telhados verdes.

No item Material e Métodos, são detalhados os materiais e os procedimentos utilizados durante a elaboração do trabalho, com a finalidade de permitir a replicabilidade em estudos futuros. Enquanto que na seção Resultados e Discussão são apresentados e discutidos de forma crítica os resultados obtidos durante a realização do experimento, comparando-os aos dados da literatura existente e discutindo-os de maneira argumentativa cada propriedade analisada.

As Considerações Finais são recapitulações sintéticas das partes mais importantes deste trabalho, fazendo-se uma correspondência entre os objetivos propostos e alcançados, além de demonstrar um posicionamento autoral diante da questão exposta. Por fim, na seção Limitações e Recomendações são apresentados os entraves encontrados durante a fase de execução do trabalho e posteriormente são elencadas algumas recomendações para a realização de pesquisas futuras.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 HISTÓRIA, DEFINIÇÕES E APLICAÇÕES DOS TELHADOS VERDES

As primeiras evidências de telhados vegetados que se tem registro, incluem os jardins suspensos da Babilônia no Oriente Médio, e os mausoléus dos imperadores romanos Augusto e Adriano. A prática do plantio na cobertura de edifícios era técnica comum na Roma Antiga (MAGILL et al., 2011). No entanto, a utilização de coberturas vegetais pode ter sido uma técnica ainda mais antiga, utilizada sobretudo nas regiões mais frias do globo como forma de isolamento térmico, sendo difícil, portanto, precisar a gênese de tal prática.

Recentemente, o conceito de telhados verdes e jardins verticais tornou-se amplamente difundido no norte da Europa, especialmente na Alemanha, Suíça, Áustria e Escandinávia, devido, principalmente, à maior preocupação com a qualidade do ambiente urbano e o rápido declínio dos espaços verdes em áreas intensamente urbanizadas (PECK et al., 1999).

Segundo Peck et al. (1999), uma quantidade significativa de investigações técnicas sobre telhados verdes foi realizada na Alemanha a partir da década de 70, incluindo estudos sobre membranas impermeáveis, sistemas de drenagem, substratos e espécies de plantas mais aptas às condições restritivas desses ambientes.

Em 1984, a organização alemã para a pesquisa paisagística (*Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau - FLL*), publicou as primeiras orientações a respeito do uso de telhados verdes nos centros urbanos e, posteriormente, uma versão detalhada com diretrizes para o planejamento, construção e manutenção em 2002, sendo atualizada em 2008. Atualmente, este material é considerado obra de referência por diversos autores para comparação de pesquisas relacionadas à tal técnica.

Conceitualmente, o telhado verde é entendido como uma estrutura acima do telhado convencional, que permite o desenvolvimento de uma vegetação num meio de crescimento, concebido, construído e mantido para tal fim (DOSHI et al., 2006). Para Coffman (2007), o telhado verde é um termo genérico que tem sido usado informalmente para descrever os diferentes sistemas de telhados vegetados, podendo esses serem denominados como ecotelhados, telhados vivos, telhados marrons, jardins de terraço e telhados verdes. Apesar de serem termos distintos, são por vezes utilizados alternadamente como sinônimos.

Os telhados verdes atuais podem ser categorizados em 3 grupos distintos: extensivos, semi-intensivos e intensivos, diferenciando-se principalmente quanto à profundidade do meio

de crescimento e a finalidade para a qual foram projetados. O Quadro 1 ilustra as principais características dessas tipologias.

Quadro 1 - Principais tipologias de telhados verdes e suas características

Características	Extensivo	Semi-intensivo	Intensivo
Profundidade do substrato	Entre 5 e 15 cm	Entre 10 e 20 cm	Acima de 20 cm
Acessibilidade	Na maioria das vezes inacessível	Pode ser parcialmente acessível	Normalmente acessível
Peso totalmente saturado	Leve (70-170 kg.m ⁻²)	Médio (170-290 kg.m ⁻²)	Pesado (290-970 kg.m ⁻²)
Diversidade de plantas	Baixa	Intermediária	Elevada
Comunidades de plantas	Musgo, <i>Sedum</i> , Ervas e gramíneas	Ervas, gramíneas e arbustos	Espécies perenes, arbustos e árvores
Usos	Camada de proteção ecológica	Gramados e jardins	Parque, hortas e jardins
Custos	Baixo	Variado	Elevado
Manutenção	Mínima	Variável	Alta

Fonte: Adaptado de Hui, 2006.

Os telhados verdes extensivos destacam-se pelo baixo peso acrescido à estrutura predial, pelo baixo custo de implantação e por necessitarem pouca, ou nenhuma manutenção. A profundidade do substrato varia entre 5 e 15 cm (ALLNUTT et al., 2011; CARSON et al., 2012; FRANCIS, et al. 2014), o que confere um microclima desértico ocasionado pela restrição hídrica, conseqüentemente, as espécies de plantas utilizadas, devem apresentar características rústicas e de fácil adaptação, como as espécies suculentas do gênero *Sedum* (TOWNSHEND; DUGGIE, 2007).

Os telhados verdes extensivos podem ainda ser classificados de acordo com a configuração das camadas: (i) multicamadas, quando o sistema é composto de duas ou mais camadas, com o objetivo de otimizar a drenagem da água; (ii) camada simples, quando o substrato possui uma alta eficiência de drenagem, não sendo necessário o uso de camadas adicionais para a retirada do excesso da umidade (LIESECKE, 2006).

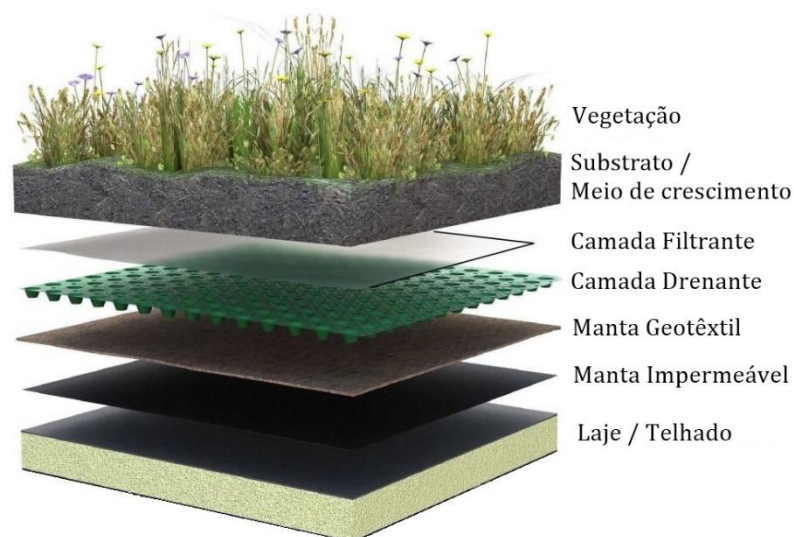
O sistema de telhado verde semi-intensivo, é tido como um intermediário entre os telhados extensivos e intensivos, apresentando características de ambos, onde a camada de substrato varia de 10 a 20 centímetros, permitindo uma gama mais ampla de plantas em comparação com os telhados verdes extensivos, incluindo arbustos e plantas lenhosas. A

irrigação e as manutenções são dependentes das espécies de plantas utilizadas (ALLNUTT et al., 2011).

Por sua vez, os telhados verdes intensivos são especialmente concebidos para proporcionar comodidade e normalmente são projetados para o uso recreativo do espaço, podendo ser idealizados como jardins, hortas ou terraços, com uma profundidade do substrato acima de 20 centímetros, relativamente rico em nutrientes, e que permite o crescimento exuberante da vegetação (ALLNUTT et al., 2011; LIVINGSTONE; ROGERS; BISHOP, 2008).

Embora os telhados verdes sejam atualmente uma tecnologia com grande aplicabilidade em todo o mundo, nem todos são executados adequadamente (HUI, 2011). Frente a isso, a observação de diretrizes e padrões faz-se necessária para a correta aplicabilidade da técnica. Simplificadamente, um telhado verde extensivo é composto, estruturalmente, por múltiplas camadas (Figura 1) com funções específicas, mas interdependentes para o bom funcionamento do sistema.

Figura 1 - Esquemática de um telhado verde extensivo de múltiplas camadas



Fonte: Adaptado de Knopik (2014).

Segundo a diretriz alemã para o planejamento, execução e manutenção de telhados verdes (FLL, 2008), a utilização dessa técnica proporciona uma significativa redução do escoamento superficial, devido ao armazenamento de água na camada de substrato (eventualmente na camada drenante), e a conseqüente desaceleração dos picos de escoamento na rede de drenagem, proporcionando uma perspectiva ecológica e econômica a ser considerada.

A utilização de telhados verdes em grandes centros urbanos é parte de uma tendência mundial de sustentabilidade, que busca aumentar o conforto térmico das edificações através do mínimo consumo de energia (BENGTSSON; GRAHN; OLSSON, 2004). No entanto, com o aumento dos problemas ambientais nos grandes centros urbanos, os telhados verdes passaram a desempenhar diversos outros papéis para mitigar os infortúnios decorrentes do processo de urbanização.

Os benefícios ambientais fornecidos pelos telhados verdes derivam do seu funcionamento como ecossistemas (OBERNDORFER, 2007), sendo proporcionais e dependentes do sucesso da vegetação (biomassa, cobertura foliar e fitossanidade), e das propriedades inerentes aos substratos utilizados (capacidade de retenção e armazenamento de água).

Dessa forma, considerando-se que, além do clima local, o sucesso da vegetação é também devido às propriedades do meio de crescimento, tais como, o armazenamento de água e nutrientes, a capacidade de troca de cátions e ânions e a capacidade de drenagem e aeração. O substrato ou meio de crescimento é, provavelmente, uma das componentes com maior importância no adequado desempenho de um telhado verde (CARSON et al., 2012).

2.2 TELHADOS VERDES E A GESTÃO DAS ÁGUAS PLUVIAIS

Durante muitas décadas a drenagem urbana baseou-se numa lógica higienista, afastando as águas o mais rápido possível do meio urbano, através de condutos artificiais, preferencialmente subterrâneos e lançando-as em corpos d'água a jusante (SNSA, 2007; ZANOTTI et al., 2014). A partir dos anos 70, introduziu-se o conceito tecnologias alternativas ou compensatórias, com a finalidade de neutralizar os efeitos da urbanização sobre os processos hidrológicos (SNSA, 2007). Mais recentemente, a abordagem ambientalista surgiu com o objetivo de manter e recuperar o ambiente, de forma a tornar a área urbana mais saudável, ao invés de apenas neutralizar os problemas decorrentes da urbanização (MDU, 2002).

A eficiência dos telhados verdes na redução substancial no escoamento pluvial, vem sendo comprovada em diversos estudos de longa duração. De acordo com essas pesquisas, é possível reter até 80% do volume total precipitado anualmente (GETTER; ROWE; ANDRESEN, 2007; HUTCHINSON et al., 2003; MENTENS et al., 2006; MONTERUSSO et al., 2004), assim como, a total retenção de eventos menores, principalmente, quando ocasionados após um período prolongado de estiagem (STOVIN; VESUVIANO; KASMIN, 2012).

Nesse sentido, os telhados verdes absorvem e retêm a água da chuva, e podem ser usados para gerenciar o escoamento das águas pluviais no ambiente urbano, reduzindo ou retardando o escoamento, devido ao armazenamento de água no substrato, nas raízes e folhagens das plantas. Segundo Nagase e Dunnett (2012), um número elevado de cidades tem estabelecido políticas de gestão das águas pluviais para incentivar a difusão das técnicas de baixo impacto, dentre elas, os telhados verdes.

A composição dos substratos é uma característica que influencia diretamente o escoamento pluvial. As diferenças de retenção hídrica são por vezes consideráveis, dependendo do material agregado, da profundidade do meio de crescimento, das propriedades físico-químicas do substrato e da declividade do telhado (FRANCIS et al., 2014). Para Kolb (2004), tal variabilidade permite o uso de substratos altamente eficazes no controle do escoamento, e por consequência, nos picos de cheia.

Uhl e Schiedt (2008), monitoraram a retenção das águas pluviais em telhados verdes num período de dois anos, sob condições meteorológicas reais, e comprovaram a considerável redução nos picos de escoamento durante os eventos de chuva. Os mesmos autores destacaram a influência direta da profundidade do meio de crescimento e da declividade do telhado na redução das vazões escoadas.

A produção de escoamento também é influenciada pelas condições antecedentes de umidade do substrato, pela capacidade de retenção e evapotranspiração da vegetação e pela sequência de períodos chuvosos ou secos, variando de acordo com o clima de cada região (TASSI et al., 2014; UHL; SCHIEDT, 2008), assim como observado em ecossistemas naturais.

Pesquisas realizadas em laboratório sugerem ainda que os efeitos de retenção podem ser dependentes da intensidade da precipitação e das características físicas do substrato tais como, a profundidade e a porosidade (STOVIN et al. 2015). No entanto, estes estudos foram realizados sob condições controladas e com um único tipo de vegetação ou mesmo em substratos sem vegetação, e, portanto, não representam, de maneira significativa, o processo sob condições climáticas reais.

Outros fatores responsáveis pela capacidade de retenção de um telhado verde são a duração do evento de chuva, a radiação solar e a velocidade do vento. Além disso, os telhados verdes podem apresentar temperaturas mais altas do que as condições do solo, e consequentemente maiores taxas de evapotranspiração, responsável direta pela restituição da capacidade de retenção dos substratos (WONG; JIM, 2017).

À medida em que a capacidade hidrológica finita de um telhado verde está disponível para a retenção de um evento de chuva, a intensidade e duração da chuva irão determinar, em

grande parte, o volume de escoamento. A evapotranspiração regenera a capacidade de retenção a uma taxa que é influenciada de forma variável pelo clima, vegetação, solo e teor de umidade residual (POË et al., 2015). Logo a vegetação também irá afetar o volume de escoamento, dependendo da capacidade de cada planta para a interceptação, retenção e transpiração de água (NAGASE; DUNNETT, 2012).

Lundholm et al. (2010), estudaram sistemas de telhados verdes plantados com monoculturas e misturas de até cinco espécies diferentes, para quantificar a interceptação de água da chuva. O estudo mostrou que algumas composições mistas, superaram as melhores monoculturas na interceptação e evapotranspiração, contribuindo diretamente, para estratégias de mitigação dos picos de escoamento.

2.3 QUALIDADE DA ÁGUA ESCOADA A PARTIR DE TELHADOS VERDES

Os telhados verdes podem reduzir a poluição das águas urbanas, absorvendo e filtrando possíveis poluentes, no entanto, podem também contribuir para liberação de tais xenobióticos (BUFFAM; MITCHELL; DURTSCHKE, 2016). A qualidade da água de escoamento de um telhado verde irá depender da composição e da espessura da camada de substrato, além do tipo de vegetação e da camada de drenagem. Fatores como a idade do telhado, a frequência de manutenção e as características da área circundante são elementos com potencial de interferência na qualidade da água de escoamento (BERNDTSSON, 2010).

Em um estudo comparativo realizado por Pessoa (2016), verificou-se a qualidade da água escoada em telhados verdes extensivos e de fibrocimento. Os telhados verdes foram responsáveis pelo aporte de nutrientes às águas de escoamento, mas também foram responsáveis por aumentar o pH das águas pluviais, confirmando, assim, o seu potencial de neutralização de chuvas ácidas, conforme registrado na literatura.

As características físico-químicas do substrato e a idade do telhado desempenham um importante papel na regulação das perdas de fósforo e carbono orgânico dissolvido encontrados nas águas de escoamento. Elementos como o carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (P) são macronutrientes essenciais no desenvolvimento das plantas, portanto, necessários na composição de um bom substrato. As concentrações de nitrogênio podem decair rapidamente com a idade do telhado e variam de acordo com novas entradas (atmosférica, deposição de N, novas adições de fertilizantes, etc.) (BUFFAM; MITCHELL, 2015). No entanto, a lixiviação desses nutrientes e o transporte através do escoamento pluvial, podem atingir ecossistemas aquáticos, contribuindo para o processo de eutrofização desses mananciais.

Em geral, os telhados verdes podem apresentar uma influência positiva ou negativa na qualidade da água. Isto dependerá de inúmeros fatores, particularmente a seleção do tipo de substrato e da profundidade utilizada. Além do mais, durante eventuais fertilizações o nível de qualidade da água será alterado aumentando os teores de nutrientes lixiviados (NAGASE; DUNNETT, 2011).

Telhados verdes jovens, produzem um percolado com altas concentrações de nutrientes, devido às elevadas quantidades presente no substrato, tendendo a diminuir com o passar do tempo. Outro fator importante, é a densidade das raízes das plantas que podem, também, melhorar a qualidade da água escoada por proporcionarem uma espécie de filtragem (CHEN; KANG, 2016), o que reitera a necessidade de seleção de espécies adaptadas às condições climáticas para que o desempenho da vegetação proporcione tal melhoria, bem como, contribua para o aumento da biodiversidade urbana (ALUISIO, TUININGA e LEWIS, 2016).

2.4 BIODIVERSIDADE NOS TELHADOS VERDES

Outro benefício público decorrente da utilização de coberturas vegetadas, está relacionado ao aumento da biodiversidade urbana. Alguns estudos mostram que os telhados verdes têm um grande potencial para a diversidade biológica, apresentando uma rica fauna de invertebrados que habitam essas estruturas (BRENNEISEN, 2006; COLLA et al., 2009; DUNNETT, 2006; KADAS, 2006).

No entanto, segundo Brenneisen (2006), a diversidade da fauna que habita o meio de crescimento nos telhados verdes é dependente do nível de exposição à radiação solar e da heterogeneidade dos substratos, ou seja, substratos compostos por um único material podem diminuir a diversidade de microrganismos presentes no meio. Além do mais, com o aumento da espessura do meio de crescimento, e a conseqüente diminuição da radiação solar incidente, poderá haver o aumento da atividade biológica, além de permitir a instalação ou colonização de uma vegetação mais densa e de maior diâmetro em comparação com àquela utilizada em telhados verdes extensivos, onde a espessura da camada de substrato não ultrapassa 150 mm.

Os telhados verdes quando projetados para aumentar a biodiversidade local, devem empregar, preferencialmente, vegetação nativa. Além disso, deve-se incorporar diferentes camadas de vegetação e características paisagísticas, como galhos, rochas e diferentes tipos de substratos, com a finalidade de aumentar as oportunidades para o abrigo e estabelecimento da vida selvagem (FRANCIS et al., 2014).

Em um estudo realizado na Suíça, verificou-se altos níveis de diversidade para aves, aranhas e besouros, incluindo ainda algumas espécies ameaçadas de extinção (BRENNEISEN, 2006). Da mesma forma, uma pesquisa realizada na Inglaterra, verificou a eficiência dos telhados verdes em aumentar a biodiversidade urbana em Londres, através da utilização de plantas locais e da adaptação da configuração do telhado verde, de forma a proporcionar um ambiente atrativos para os animais, no caso estudado, para *Phoenicurus ochruros*, um pássaro localmente raro (KADAS, 2006).

O uso de plantas endêmicas, apesar da não adaptação de muitas espécies vegetais às condições restritivas dos telhados verdes (OBERNDORFER et al., 2007), proporciona um ambiente semelhante às condições naturais antecedentes a urbanização e conseqüentemente atrai uma gama maior de aves, insetos, formigas e abelhas que colonizam esses ambientes e assim aumentam a biodiversidade nos centros urbanos.

2.5 ESPÉCIES VEGETAIS PARA TELHADOS VERDES

A vegetação contribui para o arrefecimento predial por refletir e absorver a radiação solar incidente sobre o telhado, logo, é de fundamental importância que a mesma consiga se estabelecer rapidamente e que contenha mecanismos de defesa para garantir a sobrevivência da espécie quando em condições de estresse hídrico (metabolismo ácido das crassuláceas, por exemplo).

A escolha da vegetação abrange uma gama de espécies e variedades de plantas hortícolas ou selvagens, incluindo aspectos estéticos e funcionais, e dependerá da espessura da camada de substrato (Quadro 2), e das características climáticas de cada região. O escopo principal de um telhado verde construído, é buscar o máximo desenvolvimento da vegetação em um curto espaço de tempo, de forma a estabelecer uma vegetação duradoura e resistente por um longo período (FLL, 2008).

Os efeitos da composição de diferentes espécies vegetais sobre o desempenho dos telhados verdes têm recebido atenção em alguns estudos sobre os serviços ecológicos prestados por essas misturas, em comparação com monoculturas já consolidadas, a exemplo das plantas do gênero *Sedum* (DUNNETT et al., 2008; LAZZARIN; CASTELLOTTI; BUSATO, 2005; LUNDHOLM et al., 2010).

Características fisiológicas e estruturais da vegetação influenciam a sua tolerância à seca, vento, luz, sombra e poluentes, afetando o desempenho do sistema. Dessa forma, a seleção

de espécies tolerantes a tais intempéries climáticas e com baixa necessidade de intervenção são consideradas ideais para a composição de um telhado verde (ALLNUTT et al., 2011).

Quadro 2 - Tipo de vegetação utilizada de acordo com a profundidade do meio de crescimento

		Profundidade do meio de crescimento em centímetros																							
		4	6	8	10	12	15	18	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80	90	100	125	150	200		
Vegetação recomendada para cada tipologia de telhado verde	Extensivo	Plantas do gênero Sedum	■	■	■																				
		Plantas herbáceas e Sedum		■	■	■																			
		Plantas herbáceas, Sedum, gramíneas				■	■	■																	
		Plantas herbáceas e gramíneas						■	■	■															
	Semi-intensivo	Plantas herbáceas e gramíneas					■	■	■	■	■	■	■	■											
		Arbustos endêmicos e moitas						■	■	■	■	■	■	■	■	■									
		Arbustos e moitas						■	■	■	■	■	■	■	■	■	■								
		Arbustos														■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	Intensivo	Gramados						■	■	■	■	■	■	■	■										
		Arbustos pequenos e moitas						■	■	■	■	■	■	■	■	■									
		Arbustos medianos e moitas																							
		Arbustos maiores e moitas																							
		Grandes arbustos e pequenas árvores																							
		Árvores de médio porte																							
		Árvores de grande porte																							

Fonte: Adaptado de FLL, 2008.

As plantas suculentas são o grupo mais amplamente utilizado, devido, fundamentalmente, ao seu metabolismo ácido crassuláceo que permite a sobrevivência à ambientes xéricos, típicos de telhados verdes extensivos. Tais condições tendem a reduzir a possibilidade de sobrevivência de outras espécies além de impossibilitar ou reduzir drasticamente o rendimento de culturas domésticas (BUTLER et al., 2012; DUNNETT; NAGASE; HALLAM, 2008; VAN WOERT et al., 2005).

Segundo Francis (2014), a família das crassuláceas domina os meios de crescimento rasos. O baixo crescimento, fácil dispersão, grande tolerância à seca, e aptidão paisagística fazem das plantas suculentas, as mais utilizadas nos telhados verdes da Europa e América do Norte. Plantas do gênero *Sedum* têm sido as mais utilizadas na composição de telhados verdes extensivos, por serem tolerantes a temperaturas extremas, ventos fortes, baixa fertilidade do substrato e limitada disponibilidade de água (VAN WOERT et al., 2005), oferecendo uma cobertura vegetal apropriada e um bom aspecto paisagismo, além de demandar mínima manutenção (CASTLETON et al., 2010).

Conforme destacado por Francis et al. (2014), a densidade populacional deve ser elevada para proporcionar uma cobertura adequada de todo o substrato, evitando perdas por erosão eólica ou hídrica. Conforme orienta a diretriz alemã (FLL, 2008), a cobertura vegetal nos telhados verdes não deve ser inferior a 60%, para que os telhados verdes possam ser eficientes no controle do escoamento pluvial, bem como, harmônicos do ponto de vista paisagístico. Segundo a mesma diretriz, as espécies utilizadas no cultivo em telhados verdes extensivos (Quadro 2), compreendem plantas do gênero *Sedum*, gramíneas e herbáceas. A composição fisiológica de diferentes espécies se traduz em diferentes características de desempenho dos telhados verdes.

Segundo Allnutt et al. (2011), quando o objetivo é melhorar a retenção de águas pluviais, muitas vezes, utiliza-se plantas do gênero *Sedum*, devido ao padrão de consumo de água associado ao metabolismo ácido das crassuláceas. Contrariamente, um telhado que busca atender a um determinado objetivo relacionado a biodiversidade, como a criação de habitat, pode exigir uma mistura específica de espécies nativas aptas a tais condições.

Pesquisadores da Universidade de Melbourne, na Austrália, estudaram o rendimento de 56 espécies nativas e exóticas, avaliando o índice de sobrevivência na ausência de irrigação. Plantas com baixa necessidade hídrica como a *Sedum pachyphyllum* e *Sedum xrubrotinctum* apresentaram os resultados mais satisfatórios, reafirmando a adaptabilidade das plantas do gênero *Sedum* às condições restritivas dos telhados verdes extensivos (FRANCIS et al., 2014).

Dunnett, Nagase e Hallam (2008), afirmam que apesar da vegetação ser parte fundamental na composição do sistema, ainda são necessários estudos específicos voltados a seleção e avaliação da performance de diferentes espécies com aptidão para uso em telhados verdes. Esta seleção, exige uma análise cuidadosa de inúmeros fatores, tais como clima, profundidade do substrato, manutenção, resultados estéticos e funcionais (FRANCIS et al., 2014), no entanto, dois critérios elementares devem ser considerados na escolha das espécies mais aptas aos telhados verdes extensivos: a sobrevivência e tolerância ao estresse hídrico (GETTER; ROWE, 2008).

2.6 SUBSTRATO OU MEIO DE CRESCIMENTO EM TELHADOS VERDES

O substrato ou meio de crescimento utilizado em telhados verdes tem por finalidade proporcionar uma estrutura sólida, capaz de permitir a fixação das plantas e fornecer os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, sendo projetado para atender as necessidades físicas, químicas e biológicas das plantas (AMPIM et al., 2010; BUFFAM; MITCHELL, 2015;

FRANCIS et al., 2014). Além disso, esses substratos devem combinar várias propriedades físicas e químicas com o propósito de melhorar o desempenho do sistema de forma a otimizar, principalmente, a capacidade de retenção de água através do melhoramento das características da mistura.

Algumas propriedades, tais como, durabilidade, porosidade, eficiência de drenagem, isenção de ervas daninhas, baixa densidade, elevada capacidade de retenção e adequada capacidade de armazenamento de água, são de suma importância para um bom desempenho do sistema de telhados verdes (GETTER; ROWE, 2006; LENNEP; FINN, 2008; THURING; BERGHAGE; BEATTIE, 2010).

Os fatores que afetam a composição de um substrato para telhados verdes variam em função da tipologia (extensivo, intensivo ou semi-intensivo), da vegetação alvo, das condições climáticas e dos custos de implantação. Segundo Sorrill (2012), as exigências de um substrato para uso em telhados verdes são altamente específicas. Além de leve, o material deve ter boa drenagem e ser resiliente aos eventos extremos de seca, umidade, temperatura e exposição ao vento.

O uso de solos naturais não é recomendado, a menos que sejam selecionados e esterilizados até atenderem os critérios necessários para a aplicação em telhados verdes (FRIEDRICH, 2008). A utilização do substrato em substituição ao solo nos telhados verdes, relaciona-se com o propósito desta tecnologia, que visa uma maior retenção da água da chuva e a consequente diminuição do escoamento pluvial, além disso, a maior densidade do solo e o aumento da manutenção ocasionado pelo aparecimento de ervas daninhas, acabam inviabilizando a utilização direta do mesmo. Outro fator que impede a utilização desse recurso, relaciona-se ao dano ambiental ocasionado pelo processo de extração do local de origem, inviabilizando assim, a utilização em escala comercial.

Ao contrário dos solos naturais, os substratos utilizados nos telhados verdes são produzidos utilizando-se uma variedade de componentes naturais e/ou sintéticos que visam atingir um equilíbrio entre as propriedades físicas ideais desejáveis, como a baixa densidade, a boa drenagem, e a elevada capacidade de retenção de água (AMPIM et al., 2010). Para Berndtsson (2010), a retenção de água nos telhados verdes depende sobretudo da espessura e das propriedades de retenção do substrato, sendo diretamente influenciada pela declividade, idade do telhado e tipo de vegetação utilizada.

A concepção inicial de um telhado verde depende das características climáticas de cada região e da disponibilidade de materiais locais, a fim de diminuir os custos de implantação (AMPIM et al., 2010; SAILOR e HAGOS, 2011), frente a isso, não há um substrato universal

a ser utilizado em todas as regiões do globo, sendo necessárias, as devidas adaptações de acordo com as características de cada região.

Dvoraka e Volder (2010), afirmam que as condições do substrato são inteiramente diferentes das condições normais do solo, e a probabilidade de sucesso na implantação de um sistema de telhados verdes dependerá da capacidade do mesmo em reproduzir as condições hidrológicas naturais, favorecendo a ciclagem de nutrientes e por consequência o desenvolvimento das plantas.

A composição de substratos utilizados em telhados verdes envolve a mistura de materiais leves e com boa capacidade de retenção de água (CARSON et al., 2012). Um substrato típico, geralmente é composto de três componentes principais: solo, matéria orgânica e um agregado com alta porosidade e baixa densidade. Na produção dos substratos é usual a utilização de agregados minerais, capazes de aumentarem a porosidade, permitir a absorção de água e ao mesmo tempo reduzir a densidade da mistura para amortizar a carga sobre a estrutura predial (LIESECKE, 2006).

O material agregado geralmente varia de 50 a 80% do volume do substrato e a matéria orgânica entre 10 e 20% (SAILOR; HUTCHINSON; BOKOVOY, 2008). No entanto, segundo apontam Nagase e Dunnett (2011), a fração de matéria orgânica ideal estaria entre 0 e 10%, pois quanto maior é o teor orgânico do substrato, maior será a susceptibilidade do mesmo a perder volume ao longo do tempo. Para Francis et al. (2014), a fração de matéria orgânica é normalmente mantida a uma proporção baixa devido ao seu tempo de vida relativamente curto, decaindo ao longo do tempo, e podendo ter propriedades hidrofóbicas que diminuam a capacidade de retenção do substrato, além de alterar consideravelmente a qualidade da água que passa pelo meio de crescimento.

Um ponto importante a ser considerado, refere-se ao desenvolvimento da vegetação, diretamente influenciado pela componente orgânica do substrato. Para Young (2014), um crescimento exuberante não é algo desejável em telhados verdes extensivos, pois pode aumentar a necessidade de manutenções, bem como, reduzir a tolerância da vegetação às condições de estresse hídrico. Quanto mais abundante for a vegetação, maior será a necessidade hídrica para manter a biomassa vegetal.

Em geral, telhados verdes intensivos precisam de teores maiores de matéria orgânica, para aumentar a retenção de água e fornecer os nutrientes essenciais ao desenvolvimento da vegetação. Em contrapartida, os telhados verdes extensivos necessitam de quantidades maiores de agregados minerais (AMPIM et al., 2010; LIESECKE, 2006).

O material agregado permite a boa drenagem da água e o arejamento no substrato, contudo, é por vezes ineficiente no armazenamento de nutrientes essenciais ao desenvolvimento das plantas, fazendo-se necessário a adição de um composto orgânico capaz de sustentar a vegetação, de forma a garantir o desenvolvimento da mesma (CARSON et al., 2012).

O uso de um substrato inadequado pode resultar em problemas relacionados a drenagem da água, ao aparecimento de ervas daninhas e a perda de matéria orgânica por mineralização, podendo levar ao colapso do sistema (HUI, 2011). Nesse sentido, percebe-se que, por serem extremamente variáveis em sua composição, os substratos utilizados em telhados verdes possuem uma infinita gama de variações nas propriedades físicas, químicas e biológicas, dificultando a uniformização da mistura e trazendo impactos significativos sob o desenvolvimento da vegetação.

2.6.1 Componente orgânica

É sabido que a matéria orgânica aumenta a capacidade de permuta catiônica, reduzindo desse modo a lixiviação de nutrientes. No entanto, para Nagase e Dunnett (2011), o uso de material orgânico em substratos para telhados verdes extensivos, deve ser administrado com parcimônia, devido, principalmente, às modificações sofridas ao longo do tempo, reduzindo, sobretudo, a espessura do meio de crescimento. A diretriz alemã (FLL 2008), recomenda a utilização de valores inferiores a 10% do volume total do substrato.

Skinner (2005), especifica que a componente orgânica deve ter uma relação carbono/nitrogênio baixa, pois ao contrário do que acontece em solos naturais onde a matéria orgânica é acumulada através da decomposição contínua de materiais, nos substratos, a fonte primária desta componente é, em sua grande maioria, aquela acrescentada durante a composição da mistura.

Segundo Friedrich (2008), o uso do composto orgânico proveniente do processo de compostagem como fonte de matéria orgânica é altamente indicado para o uso na composição do substrato, o elevado teor de nutrientes e a microbiota presente no meio, favorecem a fertilidade do substrato e permitem o bom desenvolvimento das plantas.

Outra alternativa para a componente orgânica é a utilização de vermicomposto. Segundo a Embrapa Agrobiologia (2011), a vermicompostagem é o processo de reciclagem de resíduos orgânicos utilizando-se minhocas com o intuito de acelerar o processo natural de compostagem. O produto final desse processo é um fertilizante eficiente, capaz de melhorar os

atributos químicos, físicos e biológicos do substrato, com teor de umidade menor, facilitando, assim, o manuseio e a dispersão dos grânulos (ROLA; SILVA, 2014).

Em telhados verdes, à medida que a matéria orgânica se torna mais velha, a taxa de decomposição da mesma acaba sendo muito reduzida impossibilitando o fornecimento de nutrientes suficientes para o desenvolvimento das plantas. Níveis iniciais elevados de matéria orgânica podem ser benéficos para o crescimento inicial da vegetação, acelerando a completa cobertura do meio de crescimento, no entanto, a matéria orgânica e o teor de carbono alcançarão um equilíbrio com o passar do tempo, sendo necessária a adição de materiais orgânicos, como o produto da vermicompostagem, para a manutenção da vegetação e melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas dos substratos (NAGASE; DUNNETT, 2011).

2.6.2 Propriedades físico-químicas e biológicas dos substratos

A composição de um substrato é condicionada pelas características físicas, químicas e biológicas do material, destacando-se, densidade, pH, capacidade de troca de cátions (CTC), condutividade elétrica (CE), porosidade total, espaço de aeração e a capacidade de retenção e armazenamento de água (KÄMPF, 2008; LIESECKE, 2006; ZORZETO et al., 2014).

Algumas características físicas exercem efeito preponderante, uma vez que a alteração destas afeta a qualidade da composição. Atributos como a densidade volumétrica, a porosidade e a capacidade de retenção de água se sobressaem, e por vezes são utilizados como indicativo da qualidade e das limitações da mistura (KÄMPF, 2008).

Outra propriedade física essencial à um bom substrato é a boa capacidade de drenagem, no entanto, com a evolução da tecnologia dos telhados verdes durante as últimas décadas, novas características passaram a ser consideradas na seleção do substrato ideal, visando, principalmente, a retenção da água da chuva e a qualidade da água de escoamento (FRIEDRICH, 2008).

Segundo Friedrich (2008), para atingir um desempenho satisfatório, existem características essenciais a serem observadas na escolha ou produção de um substrato para uso em telhados verdes, entre elas:

- A capacidade de retenção de água sem que ocorra o completo preenchimento dos macroporos e a consequente asfixia das plantas;
- Boa drenagem e arejamento;
- Capacidade de retenção de nutrientes (capacidade de troca de cátions – CTC);
- Durabilidade e resistência a decomposição;

- Leve, mas resistente as forças de cisalhamento provocadas pela água e pelo vento;
- Estável, para servir de suporte para as plantas.

As características físicas do substrato são também influenciadas de acordo com as configurações do telhado. Segundo Liesecke (2006), em telhados verdes extensivos com camada simples, o substrato utilizado deve ter uma maior granulometria, facilitando a drenagem e proporcionando estabilidade ao longo do tempo. Em contrapartida, substratos com camadas múltiplas apresentam uma proporção menor de cascalho e um incremento de material orgânico.

A diretriz alemã para o planejamento, execução e manutenção de telhados verdes (FLL, 2008) estabelece uma granulometria do substrato para telhados verdes extensivos não superior a 20 mm. Em termos de composição e distribuição granulométrica, esta, irá interferir diretamente na porosidade e conseqüentemente na distribuição de microporos e macroporos, responsáveis pela capacidade de retenção e/ou drenagem da água.

A densidade é outra propriedade com interferência na porosidade, na retenção de água e disponibilidade da mesma para as plantas, bem como na resistência do substrato a penetração da água. Segundo Klein (2008), é definida como sendo o quociente da massa de sólidos pelo volume ocupado pelos mesmos, sendo afetada, por inúmeros fatores, desde cultivos que afetem a estrutura do meio a processos mecânicos de compactação.

Quanto às propriedades químicas e biológicas de um substrato, essenciais para o bom desempenho da vegetação. O pH e a CTC destacam-se entre as propriedades químicas, bem como a atividade biológica centrada na decomposição da matéria orgânica e na ciclagem dos nutrientes (AMPIM et al., 2010).

Assim como as demais propriedades do substrato, o pH pode variar, dentro de um intervalo que permita a absorção de nutrientes pela vegetação, no entanto, a estabilidade do mesmo é essencial para uma adequada fitossanidade, pois influencia diretamente a disponibilidade dos nutrientes (AMPIM et al., 2010; ZORZETO et al., 2014).

No que se refere a CTC, esta é definida como o número total de cátions trocáveis que um solo ou substrato pode reter e que vai depender da quantidade de suas cargas negativas (PPI, 1995). A importância da CTC refere-se, não só a retenção de cátions, mas também de água, além de ter direta relação com a estruturação e consistência de um solo ou substrato.

Nos substratos utilizados em telhados verdes, os principais coloides responsáveis pela capacidade de troca de cátions são as argilas e as substâncias húmicas advindas da matéria orgânica. No entanto, alguns substratos, devido, principalmente, a sua formulação, podem ter uma reduzida CTC, e assim, inviabilizar a medição pelos métodos tradicionais de análise (AMPIM et al., 2010; FRIEDRICH, 2008; THURING; BERGHAGE; BEATTIE, 2010).

Também a escassez de nutrientes essenciais às plantas, especialmente nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg), pode limitar o desenvolvimento da vegetação e tornar necessária a aplicação de fertilizantes sintéticos para a melhoria da fertilidade do substrato (FRIEDRICH, 2008).

Segundo Skinner (2005), as plantas necessitam de pelo menos 16 nutrientes para um adequado desenvolvimento. Além de macronutrientes como carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio são necessários micronutrientes a exemplo do enxofre, ferro, manganês, cobre, boro e zinco. Logo, é fundamental a disponibilidade destes para o desenvolvimento de uma vegetação saudável nos telhados verdes.

Outro fator importante refere-se às propriedades biológicas do meio de crescimento. Segundo Sutton (2015), embora as condições ambientais nos telhados verdes sejam altamente restritivas, ainda há uma complexa comunidade de organismos subterrâneos que medeiam o fluxo de água e nutrientes e influenciam o desenvolvimento da vegetação.

A interação entre os nutrientes é fortemente influenciada pelas condições ambientais existentes. À medida em que a decomposição da matéria orgânica se acelera e os nutrientes não são utilizados pelas plantas acabam sendo lixiviados para fora do sistema, causando, quando em excesso, aporte de nutrientes às águas de escoamento e aumentando a possibilidade de eutrofização nos mananciais hídricos adjacentes (FRIEDRICH, 2008; SUTTON, 2015).

2.6.3 Retenção e armazenamento de água

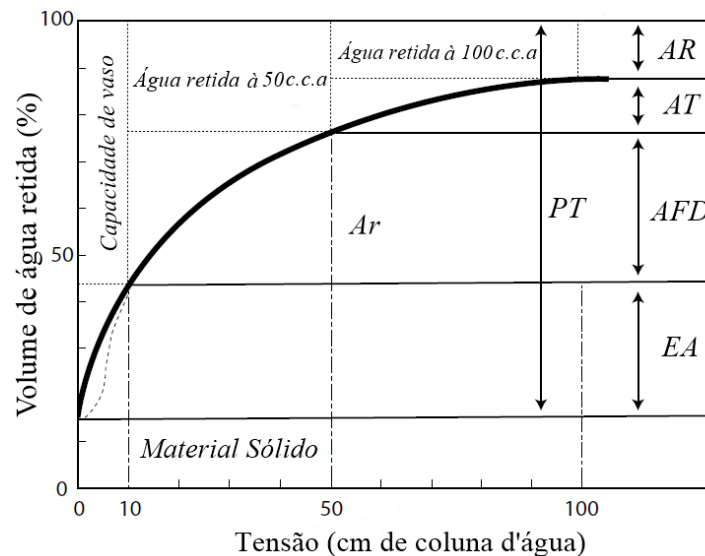
A capacidade de retenção de água de um substrato é entendida como à relação entre a umidade volumétrica e a tensão na qual a água está retida ao material (BUNT, 1988 apud ZORZETO, 2011). No entanto, tal capacidade de retenção dependerá de características físicas da mistura, tais como densidade, porosidade e granulometria. Além disso, nos telhados verdes, a retenção e o armazenamento de água no meio de crescimento é também influenciada pelas condições sazonais das chuvas e pela camada de vegetação que influenciará, sobretudo, a evapotranspiração (UHL; SCHIEDT, 2008).

Um substrato pode reter água, armazenando-a por um determinado período de tempo, e devolvendo-a para a atmosfera, contudo, nem toda água retida pelo substrato estará disponível à vegetação. Nesse sentido, os pesquisadores belgas Boodt, Verdonck e Cappaert desenvolveram na década de 70 a curva de liberação de água para substratos orgânicos (Figura 2), baseando-a na aplicação de diferentes tensões mediante um sistema de vasos comunicantes.

Esta curva foi estabelecida, limitando-se a tensão aplicada entre 0 e 100 cm de coluna d'água (BURÉS, 2001).

Deste modo, para determinar a capacidade de liberação de água do substrato, amostras são submetidas a diferentes tensões, geralmente 10, 50 e 100 kPa. A água drenada entre essa faixa de tensões é denominada, água disponível (MARTÍNEZ; ROCA, 2011; KÄMPF, 2005).

Figura 2 - Curva característica da perda de água de um substrato orgânico



EA: Espaço de aeração; AFD: Água facilmente disponível; AT: Água tamponante; AR: Água remanescente; PT: Porosidade total, c.c.a.: Centímetros de coluna d'água.

Fonte: Adaptado de Martínez e Roca (2011).

A água facilmente disponível é o volume de água liberado entre 10 e 50 cm de tensão em coluna de água sobre o substrato. A água tamponante é o volume de água retido no substrato que é utilizado quando ocorrem situações de estresse hídrico no qual a tensão matricial dos substratos atinge valores superiores a 50 kPa e finalmente, o volume de água retido no substrato após a aplicação de 100 kPa, é denominada água residual ou remanescente (AZEVEDO; TORTELLI; VIEIRA, 2014).

Quando um substrato possui excesso de macroporos, a perda de água por gravidade após a saturação tende a ser elevada, do mesmo modo, se os poros são muito pequenos, a água não estará disponível à vegetação, devido à excessiva tensão que a retém (MARTÍNEZ; ROCA, 2011). A capacidade de retenção hídrica de um substrato está diretamente relacionada às propriedades físicas do mesmo, entre elas, a porosidade, a qual é definida como sendo a porção do solo, em volume, não ocupada por sólidos, sendo a razão entre o volume poroso e o volume total de uma amostra (YU; KAMBOJ; WANG; CHENG, 2015).

Nesse sentido, o uso de materiais agregados na composição de substratos para uso em telhados verdes, prioriza o melhoramento das características físicas da mistura com a finalidade de aumentar a capacidade de retenção, regular o armazenamento e permitir a drenagem da água excedente, proporcionando a recuperação da capacidade máxima de retenção do substrato no próximo evento de chuva.

2.7 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS COMO MATERIAL AGREGADO NA COMPOSIÇÃO DE SUBSTRATOS

Um importante fator, a ser observado na composição de um substrato para telhados verdes é a seleção do material agregado, que dependerá fundamentalmente da disponibilidade regional, da capacidade de retenção hídrica e da baixa densidade, quando em condições de saturação.

A utilização de resíduos já é prática consolidada na produção de substratos para uso em telhados verdes, muitas pesquisas vêm sendo realizadas com o intuito de desenvolver um meio de crescimento leve, com alta capacidade de retenção e ambientalmente adequado (BATES et al., 2015; LIU; COFFMAN, 2016; MICKOVSKI et al., 2013; MOLINEUX; FENTIMAN; GANGE, 2009). Liu e Coffman (2016) utilizaram sedimentos dragados de um porto em Ohio nos Estados Unidos, e os submetem a altas temperaturas com o propósito de sintetizar um agregado leve com boa capacidade de retenção. O material produzido foi incorporado a um sistema de telhados verdes para comparação com o sistema convencional. Os autores constataram o potencial de reutilização dos sedimentos na produção de material agregado capaz de melhorar a capacidade de retenção do meio de crescimento e assim contribuir para a diminuição do escoamento pluvial.

Do mesmo modo, a utilização de tijolos moídos misturados à matéria orgânica e ao solo têm propiciado resultados satisfatórios na composição de substratos para uso em telhados verdes extensivos (MICKOVSKI et al., 2013). Os autores avaliaram a capacidade de drenagem, bem como a susceptibilidade à erosão e a resistência ao deslizamento quando em condições de declividade. O estudo concluiu que a utilização de 20% de resíduo de construção sob o volume total do substrato, mostrou-se mais eficaz no processo de retenção hídrica, não havendo alterações consideráveis na qualidade da água de escoamento. Além do mais, devido a elevada estabilidade desse material o substrato apresentou uma considerável resistência aos processos erosivos, quando em comparação com outros materiais.

No entanto, a principal implicação negativa da utilização de resíduos da construção civil é o incremento da carga à estrutura predial, em geral, resíduos de demolição são substancialmente pesados e o seu uso na composição do substrato deve ser feito com precaução. A diretriz alemã para telhados verdes (FLL, 2008), não especifica a carga máxima permitida, entretanto, diversas outras diretrizes (Tabela 1) apresentam valores similares, servindo como parâmetro de seleção.

Tabela 1 - Valores de densidade aparente utilizados em diretrizes internacionais para telhados verdes extensivos

Diretriz / Normativa	Peso totalmente saturado	Referência
Technical Guidelines for Green Roofs Systems in Hong Kong	70 - 170 kg/m ²	(HUI, 2011)
Living Roofs and Walls Technical Report: Supporting London Plan Policy	80 - 150kg/m ²	(LIVINGSTONE et al., 2008)
FLL - Guideline for the Planning, Execution and Upkeep of Green-Roof Sites	---	---
Green Roofs Over Dublin: A Green Policy Guidance Paper for Dublin	60 - 240 kg/m ²	(KOLB e SCHWARZ, 1999).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em contrapartida, os resíduos da rizicultura destacam-se pela baixa densidade, além da alta durabilidade do material. A utilização da casca de arroz na composição de substratos para produção de mudas em viveiros já é uma técnica bem consolidada, conferindo ao substrato, leveza, porosidade e boa drenagem, além da longa durabilidade e resistência as alterações das propriedades físicas ocasionadas pelo processo de decomposição (CARRIJO et al., 2002).

A casca de arroz tem uma densidade aproximada de 130 kg.m⁻³ e demora aproximadamente cinco anos para a completa decomposição no ambiente. Sua composição, formada, fundamentalmente por sílica (SiO₂), celulose, hemicelulose e lignina, confere uma alta resistência a decomposição (LI et al., 2011; MAYER et al., 2006).

Devido à baixa densidade e peso específico, além de lenta biodegradação, a casca de arroz apresenta pH próximo da neutralidade, baixa salinidade, elevada porosidade e elevado espaço de aeração. Fatores esses, que favorecem o uso da mesma como condicionador de substratos (SOUZA et al., 2010). Segundo Kämpf (2005), entende-se por condicionador o componente que irá melhorar, significativamente, as propriedades do meio de cultivo de forma

a torná-lo mais adequado ao desenvolvimento das plantas, não representando um volume superior a 50% da mistura.

Elementos como cálcio, magnésio, potássio, sódio, fósforo, enxofre, alumínio, manganês e ferro também são encontrados na casca de arroz, apesar das quantidades reduzidas existentes (RAO; SASTRY; ROHATGI, 1989). Quanto ao carbono presente no material, este tem uma superfície estendida, com macro e microporosidades que possibilitam um alto potencial de adsorção após um processo incompleto de combustão – a carbonização (CHAND et al., 2009).

O uso da casca de arroz como material agregado em substratos para telhados verdes pode ser uma alternativa economicamente viável e ambientalmente adequada para a destinação desse passivo ambiental. Noya et al. (2017), utilizaram casca de arroz carbonizada na composição de diferentes substratos e verificaram resultados satisfatórios na melhoria das características físicas das misturas, no entanto, vale salientar que a carbonização da casca de arroz deve seguir parâmetros estabelecidos pela legislação, de forma a evitar problemas ambientais decorrentes da má gestão do processo. No estado do Rio Grande do Sul essa regulamentação é feita pela diretriz técnica 002/2011 – DIRTEC/FEPAM que orienta para a gestão de resíduos caracterizados como casca de arroz e cinzas resultantes do processo de queima (FEPAM, 2011).

Além do mais, a disposição inadequada deste material pode gerar quantidades significativas de metano durante o processo de decomposição. Frente a isso, é fundamental impedir a aplicação direta no ambiente, devido, fundamentalmente, ao caráter abrasivo do material, ao reduzido valor nutritivo e a lenta biodegradação (WALTER; ROSSATO, 2010).

O estado do Rio Grande do Sul destaca-se pela notória produção de arroz no panorama nacional. Na safra 2016/2017 foi responsável por aproximadamente 70% de toda produção brasileira, com uma área plantada de 1.106.527 hectares e uma produção de 8.746.825 toneladas (IRGA, 2017). Segundo Della, Kühn e Hotza (2005), para cada tonelada de arroz *in natura*, 23% correspondem a casca, e 4% a cinzas. Por não possuir valor agregado as cascas são normalmente utilizadas como fonte de calor na secagem do próprio grão, devido à alta dureza e fibrosidade, além da natureza abrasiva e do alto poder calorífico. No entanto, muitas vezes, os resíduos sólidos gerados na indústria de beneficiamento do grão, são destinados inadequadamente no meio ambiente, criando, potenciais problemas ambientais, além da perda de matéria-prima.

Estudos relativos à produção de produtos derivados da casca de arroz, são escassos e, praticamente, inexistem projetos de exploração desta matéria-prima em larga escala. Dentro

deste contexto, o aproveitamento deste resíduo, torna-se cada vez mais importante, visto a quantidade de biomassa residual produzida anualmente (RAMBO, 2009).

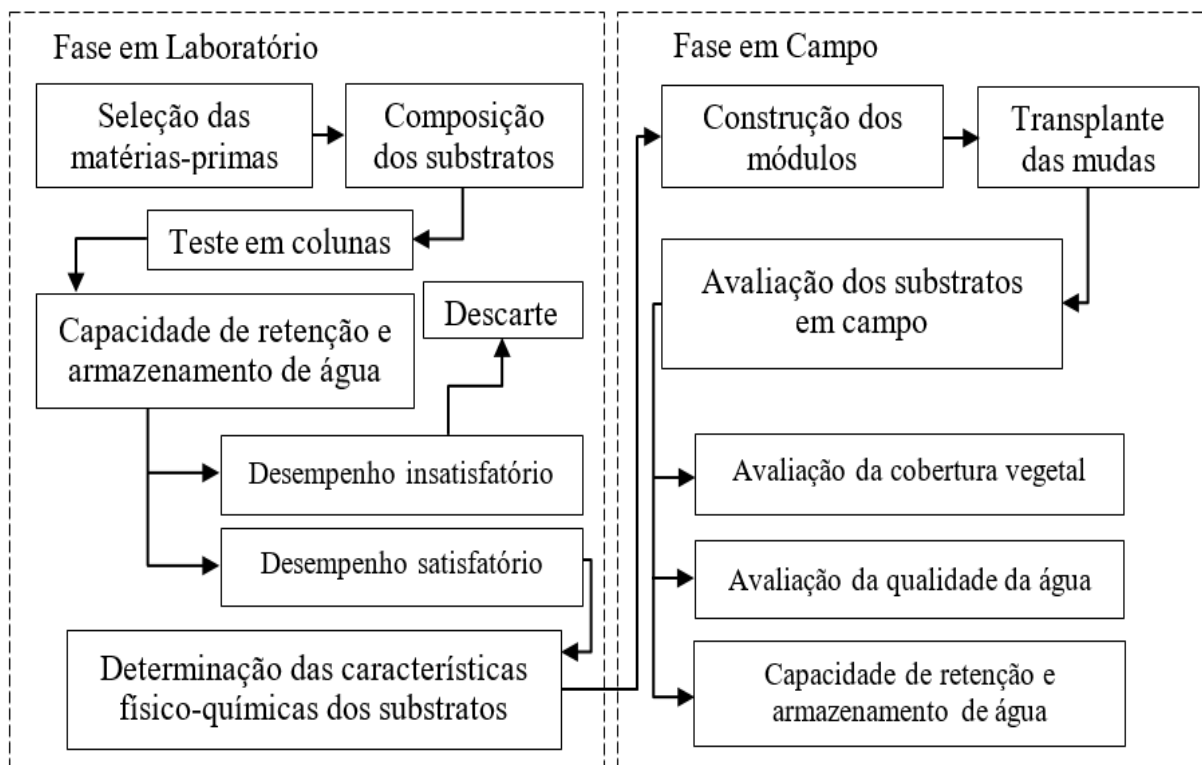
Dessa forma, o presente trabalho, mostra-se com grande potencial para servir como ferramenta de apoio à novas pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de substratos para uso em telhados verdes. Utilizando materiais alternativos que possibilitem o aprimoramento da técnica de modo a torná-la mais popular e sustentável do ponto de vista econômico e ambiental. Nesta pesquisa, optou-se pelo uso de resíduos da construção civil e da rizicultura, devido a disponibilidade local e à necessidade de uma destinação para estes materiais. No entanto, existe uma vasta gama de materiais alternativos com potencial de utilização, e que podem ser objeto de estudo em pesquisas futuras.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Para atingir aos objetivos propostos neste trabalho, inicialmente, foram realizados ensaios laboratoriais nas dependências do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), onde verificou-se a capacidade de retenção e armazenamento de água de dezesseis diferentes composições de substratos. Desse conjunto, foram selecionadas as dez melhores composições para uma instalação experimental em campo. O sistema instalado em campo, composto por dez tratamentos e quatro repetições, foi constituído por módulos experimentais onde foram simuladas as condições equivalentes a um telhado verde real, avaliando-se a taxa de cobertura vegetal, a qualidade e a quantitativa de água percolada em cada tratamento.

As etapas metodológicas são esquematizadas na Figura 3 e descritas com melhor detalhe na sequência.

Figura 3 - Fluxograma das etapas metodológicas desenvolvidas na pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 ANÁLISES PRELIMINARES EM LABORATÓRIO

Para a composição dos substratos a serem avaliados em campo, inicialmente, foram testadas em laboratório diferentes proporções de solo e casca de arroz, mantendo-se fixos os volumes de resíduo da construção civil, vermiculita e vermicomposto. As misturas foram submetidas a um teste preliminar em colunas de PVC para determinação da capacidade de armazenamento e retenção hídrica. Os testes foram realizados nas dependências do laboratório de hidráulica do Centro de Tecnologia da UFSM conforme descrição do processo a seguir:

3.1.1 Seleção dos materiais

A seleção dos materiais para a composição dos substratos levou em consideração a disponibilidade local, diminuindo assim, os custos de produção, bem como, a necessidade de uma destinação alternativa para tais passivos ambientais.

O resíduo da construção civil utilizado no experimento foi obtido em obras de construções e reformas realizadas dentro do campus universitário da UFSM. O material selecionado foi triturado e peneirado, resultando em fragmentos com diâmetro entre 1 mm e 19 mm.

Quanto à casca de arroz utilizada no experimento, esta proveio de uma indústria de beneficiamento do grão localizada no bairro Camobi, distante, aproximadamente, 2 Km da UFSM. Parte desse material foi carbonizado para utilização na composição de alguns substratos, enquanto que o restante foi utilizado sem nenhum tipo de tratamento prévio (*in natura*). A carbonização foi realizada com o auxílio de um funcionário especializado do Laboratório de Silvicultura e Viveiro Florestal da UFSM, seguindo-se os procedimentos padrões para esse tipo de processo (KÄMPF, 2005, p. 64-65).

O vermicomposto utilizado foi cedido pelo grupo de Biologia do Solo e do Ambiente, produzido no Setor de Minhocultura do Departamento de Solos da UFSM, a partir de esterco bovino. Foi realizada a caracterização química deste material pelo Laboratório Central de Análises de Solo da Universidade Federal de Santa Maria (Apêndice A).

O solo utilizado na composição dos substratos é da classe Argissolo Vermelho-Amarelo e foi extraído de uma profundidade entre 10 a 40 cm (Horizonte A), nas proximidades do local onde foi instalado o experimento em campo. A camada superficial foi removida com o propósito de evitar a importação de sementes ou restos vegetais capazes de regeneração, conforme orienta a FLL (2008). A caracterização química do solo (Anexo 1) foi realizada no

Laboratório de Solos da Universidade Regional Integrada (URI), no município de Frederico Westphalen - RS, seguindo-se a metodologia proposta por Tedesco et al. (1995). Posteriormente, foi realizada a interpretação da análise e correção da fertilidade do solo com o auxílio de um engenheiro agrônomo, através da adição de calcário e NPK (5-20-20).

A utilização do solo na composição dos substratos deu-se pelo fato deste exercer uma multiplicidade de funções, regulando a distribuição, armazenamento, escoamento e infiltração da água, além de permitir a ciclagem de nutrientes e servir como meio filtrante para a proteção da qualidade da água (UFPR, 2007). No entanto, as proporções utilizadas não ultrapassaram 50% devido a problemática ambiental já citada anteriormente.

Utilizou-se ainda, a vermiculita expandida da marca CSC[®] - Carolina Soil do Brasil Ltda como material agregado, por apresentar baixa massa específica aparente e baixa condutividade térmica, além de aumentar a porosidade do substrato e, conseqüentemente, elevar a capacidade de retenção hídrica (UGARTE et al., 2004). O material utilizado, segundo o fabricante, possui condutividade elétrica (CE) = $0,03 \text{ mS.m}^{-1} \pm 0,3$, pH de $6,5 \pm 0,5$, capacidade de retenção de água – (CRA₁₀) de 50% e densidade de $160 \text{ Kg.m}^{-3} \pm 15\%$.

Em um dos tratamentos foi utilizado 100 % de um substrato comercial, marca Garden Plus[®], vendido em floriculturas e agropecuárias da região. Esse substrato é desenvolvido a base de turfa, com condutividade elétrica (CE) = $1,5 \pm 0,2 \text{ dS.m}^{-1}$, e pH de $\pm 5,8$, conforme especificado pelo fabricante.

3.1.2 Composição dos substratos

Uma vez selecionados os materiais, estes foram utilizados na composição dos substratos. Desta forma, o substrato comercial, a casca de arroz carbonizada (CAC), a casca de arroz *in natura* (CAN), o vermicomposto (VMC), o resíduo da construção civil (RCC), a vermiculita e o solo foram combinados em diferentes proporções para a composição de dezesseis substratos a serem testados em laboratório.

As proporções de cada componente do substrato foram mensuradas em volume (FLL, 2008). Mantiveram-se fixos os volumes de vermicomposto, vermiculita, bem como as proporções de resíduos da construção civil, fixados em 20 %, conforme recomendado por Mickovski et al. (2013).

3.1.3 Teste em colunas

Um teste preliminar foi realizado em ambiente laboratorial através de um sistema de colunas, com o objetivo de verificar a capacidade de retenção e armazenamento de água das diferentes composições de substratos.

Para fins conceituais, define-se capacidade de vaso e capacidade de retenção como sinônimos, visto que ambos os conceitos se referem ao teor de água que um solo ou substrato, sem vegetação e na ausência de evaporação, retém contra a ação da gravidade após plenamente saturado e deixado drenar livremente por um determinado período de tempo (VEIHMEYER; HENDRICKSON, 1931), geralmente de um a três dias, variando conforme os critérios de cada pesquisador (CASAROLI; VAN LIER, 2008). Neste trabalho, optou-se por um tempo de drenagem de 24 horas.

Já a capacidade de armazenamento, é conceituada como a aptidão do substrato em manter as quantidades de água retidas, durante o período de saturação, ao longo do tempo. Sendo dependente, assim como a capacidade de vaso/retenção, dos materiais utilizados na composição dos substratos e das propriedades físico-químicas das misturas.

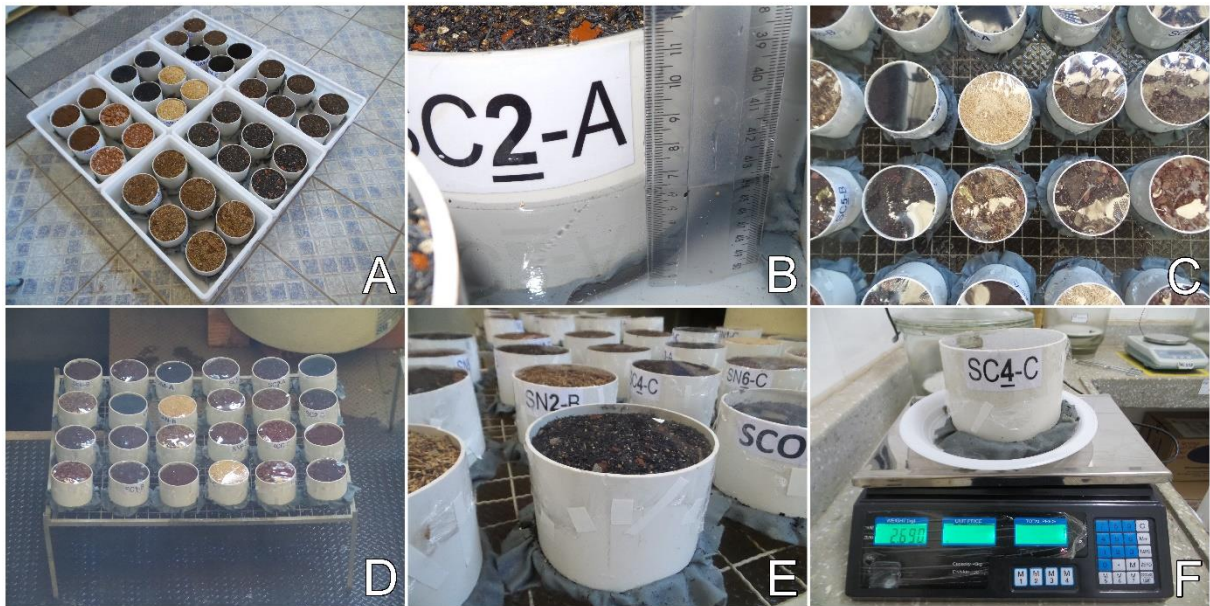
As colunas foram construídas em tubos de PVC (policloreto de vinila), com dimensões de 10 cm de altura, diâmetro interno de 150 mm, volume de 1,767 dm³ e com área de drenagem de aproximadamente 176,7 cm². Na parte inferior das colunas foram colocadas lâminas metálicas para evitar a desestruturação da camada de substrato durante o manuseio das amostras, além de uma manta geotêxtil, para diminuir a perda de substrato juntamente com o percolado. O conjunto (coluna de PVC, manta geotêxtil, borracha de fixação e lâmina metálica), foi previamente pesado antes do acondicionamento dos substratos, para posterior subtração deste peso, de forma a ser mensurado apenas o conteúdo sólido das misturas e a quantidade de água presente nas amostras após a saturação.

As colunas foram preenchidas com uma camada de 10 cm de substrato (Figura 4-A) e colocadas para saturar em bandejas com volume de água equivalente a dois terços da camada de substrato (Figura 4-B), por um período de 24 horas, permitindo, assim, a saturação por capilaridade (CASAROLI; VAN LIER, 2008; NEKTARIOS et al., 2011; SILVA et al., 2011). Nesta etapa, os testes foram realizados em triplicata, totalizando quarenta e oito colunas.

Posteriormente, as colunas foram cobertas com papel filme (Figura 4-C), para evitar possíveis perdas por evaporação. A lâmina d'água foi retirada e as amostras colocadas para drenar (Figura 4-D e Figura 4-E). As pesagens (Figura 4-F) foram realizadas no tempo zero (imediatamente após a retirada da lâmina d'água), e a cada 24 horas, até um total de 144 horas

(6 dias). Por meio da análise gravimétrica, foi possível obter as variações no teor de água em cada substrato ao longo do tempo e, dessa forma, verificar a capacidade de retenção e armazenamento de água de cada composição (NEKTARIOS et al., 2011).

Figura 4 – Ilustração das etapas do procedimento de determinação da capacidade de retenção e armazenamento de água dos substratos



Fonte: Elaborado pelo autor.

As pesagens realizadas após 24 h de drenagem proporcionaram a determinação da capacidade de vaso, capacidade de campo, capacidade de recipiente ou capacidade de retenção de cada substrato, possibilitando a extrapolação para os módulos experimentais através da relação de volume (PORTO, 2004; SANTOS et al., 2013). Segundo Kämpf (2005), um outro fator que interfere nos valores de capacidade de recipiente é a altura do vaso, pois a retenção de água será proporcionalmente maior quanto menor o tamanho do vaso. Logo, para representar de forma mais realista os valores de capacidade de vaso, as colunas utilizadas receberam a mesma espessura de substrato utilizada do experimento em campo (10 cm).

3.1.4 Seleção e caracterização dos substratos

A partir das análises realizadas na etapa anterior, foram selecionados os substratos que apresentaram resultados considerados satisfatórios para implementação em telhados verdes. Para tanto, foram considerados os seguintes princípios: capacidade de retenção após 24 h de

saturação; capacidade de armazenamento ao final das 144 h de monitoramento e carga adicional a estrutura predial quando em condições de saturação.

Após a seleção dos substratos, foi realizada a caracterização física e química dos mesmos, considerando-se propriedades como: distribuição granulométrica, densidade úmida e seca, porosidade total, água facilmente disponível (AFD), água tamponante (AT), água remanescente (AR), água disponível (AD), Espaço de aeração (EA) e capacidade de retenção de água à 10, 50 e 10 kPa, pH, matéria orgânica, CTC e macronutrientes (CAO et al. 2014; EKSI e ROWE, 2016; MIETH, 2016).

Com exceção da granulométrica, as demais características físicas foram determinadas pelo Laboratório de Biotecnologia - Análise de substratos Hortícolas, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre - RS. Os resultados foram comparados, quando possível, com os valores de referência da normativa alemã para planejamento, execução e manutenção de telhados verdes (FLL, 2008).

As densidades, úmida e seca, foram determinadas seguindo-se o método da autocompactação proposto por Hofmann (1970), e a curva de retenção de água (porosidade total, espaço de aeração, água disponível e água remanescente), nas tensões de 0; 10; 50 e 100 kPa, através do método em funis de tensão, conforme os princípios de De Boodt e Verdonck (1972).

A granulometria dos substratos foi determinada no Laboratório de Engenharia e Meio Ambiente (LEMA) – Setor de Sedimentometria e Hidrometria da Universidade Federal de Santa Maria, seguindo-se a metodologia descrita na NBR 248 para materiais agregados (ABNT, 2003). Utilizou-se uma série de crivos de diferentes dimensões com tamanhos de malha decrescentes (19 - 0,149 mm), uma amostra de 100 g de substrato foi disposta sobre o jogo de peneiras sob agitação manual, sendo realizada conforme descreve a norma, com tempo de agitação superior a 2 minutos para cada malha separadamente. Antes do procedimento, cada amostra foi seca em estufa a 65 °C durante 24 horas (PERELLI, 2014; ZORZETO et al., 2014).

Após este processo, a porção de substrato retida em cada peneira foi pesada e os valores utilizados para a determinação da porcentagem sobre a massa da amostra (ZORZETO et al., 2014). Os valores foram plotados em gráficos para fins de comparação com as especificações da diretriz alemã para meios de crescimento em telhados verdes extensivos de múltiplas camadas e camada única (FLL, 2008).

Os substratos selecionados também foram caracterizados quimicamente no Laboratório Central de Análises de Solo da Universidade Federal de Santa Maria, avaliando-se parâmetros básicos incumbidos na análise de rotina, a metodologia adotada é descrita em Tedesco et al.

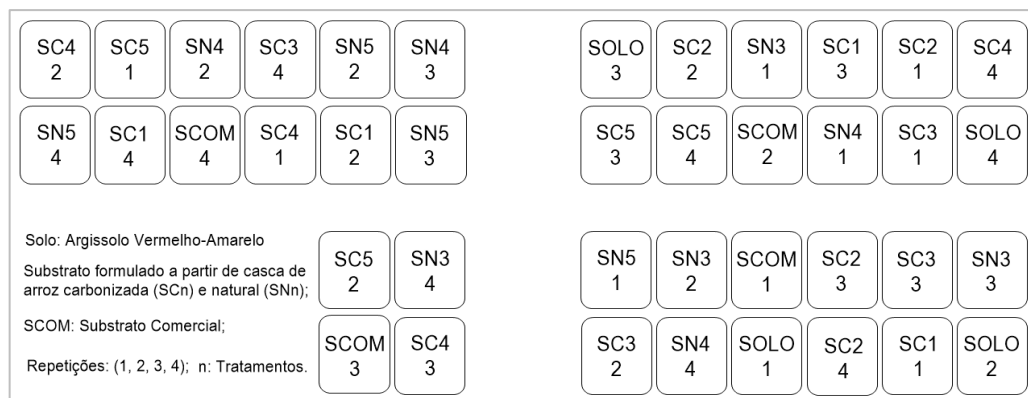
(1995). Para a determinação dos valores de nitrogênio, adotou-se a metodologia descrita por Carmo (2011), onde o teor de N (%) corresponde a 5 % do teor de matéria orgânica. A caracterização química se fez necessária para determinar a fertilidade dos substratos, e a consequente interferência no desenvolvimento da vegetação e na qualidade da água percolada.

3.2 AVALIAÇÃO DOS SUSTRATOS EM CAMPO

3.2.1 Desenho experimental, localização e clima

Para o experimento em campo, utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizados (DIC), com dez tratamentos e quatro repetições (Figura 5). Como controle, utilizou-se o tratamento composto por 100% solo do Horizonte A, da classe Argissolo Vermelho-Amarelo. Além disso, para fins comparativos, em um dos tratamentos, foi utilizado o substrato comercial Garden Plus®.

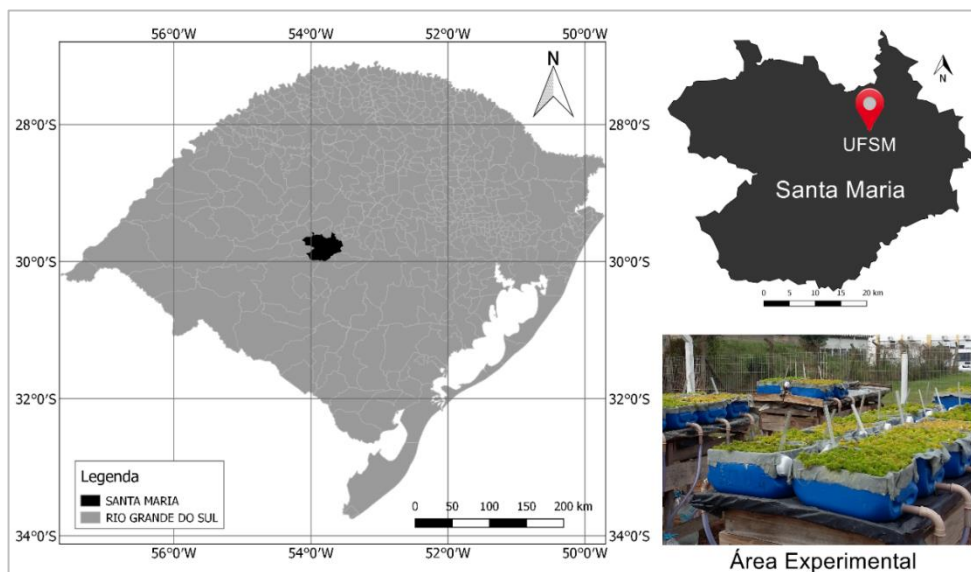
Figura 5 - Arranjo experimental em DIC com dez tratamentos e quatro repetições



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os módulos foram instalados na área experimental do grupo de Ecotecnologias, situada na latitude 29° 42' 48'' S e longitude 53° 43' 07'' O, nas dependências da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, região central do estado do Rio Grande do Sul (Figura 6), na unidade morfológica denominada Depressão Central, numa zona de transição entre os biomas Pampa e Mata Atlântica (LÖBLER et al., 2015). O clima é definido como Subtropical II, mediantemente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias, segundo a classificação proposta por Rossato (2011).

Figura 6 - Localização da área experimental e das bancadas do experimento realizado em campo



Fonte: Elaborado pelo autor.

No local, e nas imediações do mesmo, há a predominância de gramíneas rasteiras e algumas árvores exóticas do gênero *Eucalyptus*, bem como, construções de madeira e alvenaria, que não exerceram influência significativa sob os módulos experimentais. A área experimental é totalmente cercada para evitar a aproximação de pessoas ou animais que possam prejudicar o correto andamento das pesquisas desenvolvidas *in situ*.

3.2.2 Construção dos módulos experimentais

Os módulos experimentais foram construídos em containers plásticos de 20 dm³, com dimensões de 36 cm x 27 cm x 15 cm. Dentro de cada módulo experimental foram simuladas as condições equivalentes a um sistema de telhado verde de multicamadas (plantas, meio de crescimento, manta geotêxtil (filtro) e camada drenante).

Para a camada de drenagem, foi utilizada uma geomembrana tridimensional, comercialmente conhecida como MacDrain 2L[®], com 10 mm de filamentos de polipropileno e termosoldado, possuindo duas camadas geotêxteis nas extremidades que funcionam como filtro (Figura 7). Segundo o fabricante, o material possui mais de 90% de espaços vazios elevando a capacidade drenante.

Existem outros tipos de camadas drenantes disponíveis no mercado e a utilização destas, certamente modificaria alguns dos resultados observados, portanto salienta-se que as

conclusões aqui apresentadas, se referem a utilização da geomembrana tridimensional MacDrain 2L[®].

Figura 7 - Especificações da geomembrana MacDrain 2L[®]



Fonte: Adaptado de Maccaferri (2014).

Uma segunda manta geotêxtil foi colocada entre a geomembrana drenante e o meio de crescimento, com a finalidade de reduzir o processo de colmatção e evitar a migração de partículas finas a partir do substrato para a camada de drenagem. Na parte inferior de cada módulo, entre a geomembrana tridimensional e a manta geotêxtil, foi instalado, longitudinalmente, um cano de PVC com 25 mm de diâmetro, com o intuito de conduzir a água excedente. O cano foi perfurado e envolto por uma manta geotêxtil, em uma das extremidades foi acoplado uma curva de 90° de mesmo diâmetro a qual foi conectada a uma mangueira transparente $\frac{3}{4}$, utilizada para o direcionamento da água aos recipientes coletores para posterior quantificação do volume percolado e separação de alíquotas para a análise de qualidade da água (Figura 8). Os recipientes coletores, com volume de 5 litros, foram projetados para receber um volume de chuva de até 50 mm, após saturação total da camada de substrato.

Posteriormente, cada módulo recebeu igualmente o volume de 9,72 dm³ de substrato, com uma espessura de 10 cm, estando dentro da faixa empregada em telhados verdes extensivos (5-15cm).

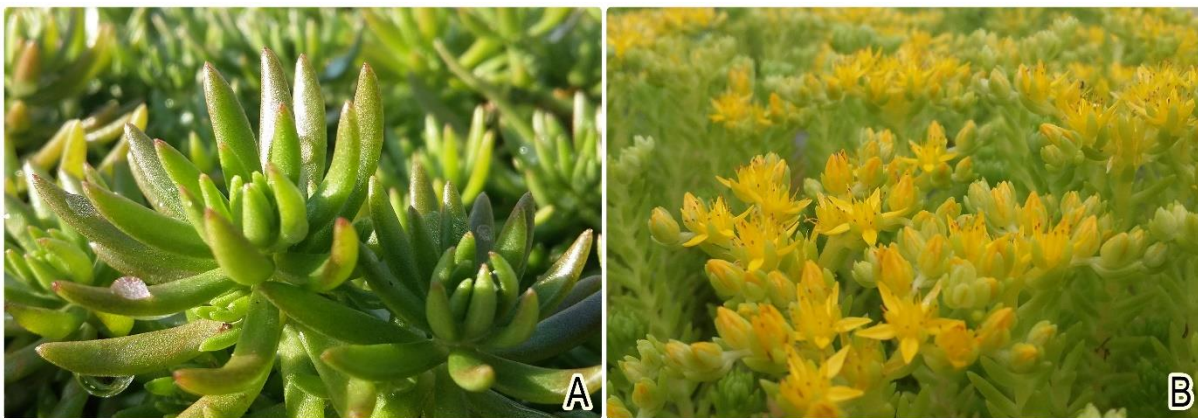
Após a montagem dos módulos experimentais, e acondicionamento dos respectivos substratos, realizou-se o transplante das mudas de *Sedum rupestre* (Figura 9), oriundas de uma residência próxima ao local de instalação do experimento. O plantio foi realizado no mês de maio de 2017, a um espaçamento de 5 cm entre plantas, totalizando trinta mudas por módulo. Nas primeiras duas semanas pós plantio, período de aclimação das mudas, os módulos foram mantidos ao abrigo da incidência direta de sol e chuva, sendo irrigados diariamente até o completo estabelecimento das mudas, para diminuir o estresse pós-transplante.

Figura 8 – Processo de montagem dos módulos experimentais



Fonte: Elaborado pelo autor.

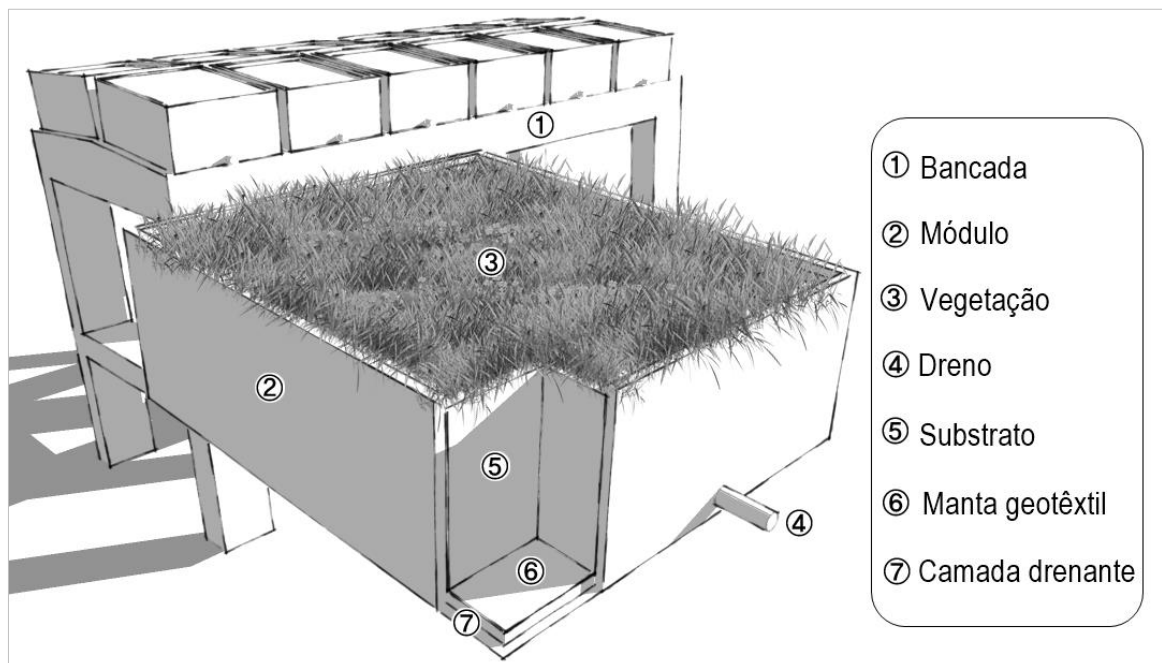
A escolha da *Sedum rupestre* baseou-se em estudos precedentes, realizados na Universidade Federal de Santa Maria que comprovaram sua adaptabilidade às condições climáticas locais (JOBIM, 2013; LORENZINI NETO, 2014; TASSI et al., 2014). Plantas do gênero *Sedum* são empregadas mundialmente em telhados verdes extensivos, por possuírem alta tolerância ao estresse hídrico e, conseqüentemente, sobreviver a condições restritivas.

Figura 9 - *Sedum rupestre* nas fases vegetativa (A) e reprodutiva (B)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Vinte dias após o transplante da vegetação, os módulos experimentais foram colocados sob condições naturais e dispostos em bancadas elevadas a 1 m do solo com declividade de 1% (Figura 10). A partir desse momento, a vegetação não recebeu nenhum tipo de rega, permanecendo sujeita às condições meteorológicas locais.

Figura 10 - Representação de uma bancada e de um módulo experimental simulando as múltiplas camadas de um telhado verde extensivo



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 MONITORAMENTO EXPERIMENTAL

3.3.1 Cobertura vegetal

O monitoramento do desempenho da *Sedum rupestre* submetida aos diferentes substratos foi necessário para avaliar a adequabilidade dos mesmos ao desenvolvimento da vegetação.

A análise das modificações na cobertura vegetal foi realizada por meio do processamento de fotografias obtidas mensalmente, com o auxílio de uma câmera digital da marca SAMSUNG® com 16 MP de resolução. As tomadas de imagem foram realizadas sempre na mesma altura, à 25 cm acima da borda de cada módulo com o auxílio de um suporte em

madeira (Figura 11), utilizado para padronizar o ângulo e a altura de registro (BEATRICE, 2011; RICHARDSON; KARCHER; PURCELL, 2001).

Figura 11 - Suporte em madeira utilizado para aquisição das imagens fotográficas



Fonte: Elaborado pelo autor.

As fotografias foram registradas, preferencialmente, no período entre 10 horas da manhã e 14 horas da tarde, em dias de poucas nuvens, a fim de se obter melhor resultado na captura do espectro luminoso pelo sensor da máquina fotográfica (BEATRICE, 2011). Cada imagem recobriu uma área de $0,054 \text{ m}^2$, portanto, inferior à superfície do módulo experimental de $0,0972 \text{ m}^2$, evitando-se assim, possíveis interferências de borda, que poderiam alterar o resultado final.

As fotografias não passaram por nenhum tratamento prévio e foram analisadas com o auxílio do Software ImageJ[®] (NOYA et al., 2017). A evolução da cobertura vegetal foi determinada por meio da quantificação do número de pixels que representam a taxa de cobertura vegetal. Para isso, as imagens foram binarizadas nas cores preta e branca, selecionando-se os objetos de interesse (vegetação), sendo que os pixels pretos representam a vegetação e os

brancos a superfície do substrato sem vegetação. Deste modo, através do comando *Summary* obteve-se a porcentagem de cobertura vegetal de cada amostra (*%Area*) (Figura 12).

Figura 12 - Ilustração do *layout* do programa IMAGEJ® para quantificação da taxa de cobertura vegetal através da porcentagem de área coberta



Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada fotografia representou uma amostra do módulo analisado, e a taxa de cobertura vegetal mensal de cada substrato foi obtida através da média das quatro amostragens, sendo apresentada em porcentagem de cobertura vegetal por metro quadrado de área.

3.3.2 Capacidade de retenção hídrica

A retenção hídrica foi avaliada com base no monitoramento hidrológico de cada unidade experimental. Para esse fim, foram monitorados o volume de precipitação diária incidente entre as 17 h do dia anterior e 17 h do dia de medição, bem como, o volume escoado em cada módulo após o evento de chuva.

O volume de chuva foi mensurado através de um pluviômetro do tipo *Ville de Paris*, instalado dentro da área experimental. A consistência dos dados foi realizada comparando-se os valores registrados no pluviômetro com os dados de um pluviógrafo instalado em uma estação climatológica automática localizada a aproximadamente 1,5 Km da área experimental. A operação e manutenção do pluviógrafo é de responsabilidade do Instituto Nacional de

Meteorologia (INMET), assim como os dados de temperatura e radiação, além de outras variáveis meteorológicas.

O volume de escoamento produzido por cada módulo experimental, drenado e armazenado no recipiente coletor, foi mensurado com auxílio de uma proveta graduada com capacidade máxima de 1000 mL. Para o cálculo da taxa de retenção e do coeficiente de escoamento utilizou-se a média do volume escoado das quatro repetições.

A taxa de retenção para cada tratamento foi calculada através da Equação 1:

$$TR = \frac{P - Ve}{P} \cdot 100, \quad (1)$$

Sendo: TR a taxa de retenção para cada substrato (%), P a precipitação total (mm) e Ve o volume de escoamento total médio das quatro repetições (mm).

Adicionalmente, foi determinado o coeficiente de escoamento superficial de cada substrato (Equação 2).

$$c = \frac{Ve}{P}, \quad (2)$$

Sendo: c adimensional, Ve o volume de escoamento total médio das quatro repetições (mm), e P a precipitação total (mm).

Com a finalidade de avaliar possíveis influências do período antecedente ao evento chuvoso na capacidade de retenção hídrica de cada substrato, foram determinados o número de dias secos anteriores ao evento de chuva. Para tanto, foram desconsideradas as precipitações com volume inferior a 2 mm.

3.3.3 Qualidade da água de escoamento

A análise qualitativa da água escoada a partir de cada módulo experimental foi realizada por meio da determinação de parâmetros físicos (cor aparente, turbidez, sólidos totais) e químicos (pH, condutividade elétrica e fósforo total).

Assim, após os eventos chuvosos, fez-se a mensuração do volume de água escoado em cada módulo experimental e, concomitante a este procedimento, eram separadas quatro alíquotas com mesmo volume (uma para cada repetição) para constituir uma amostra composta.

Para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, após cada evento, os recipientes coletores eram esvaziados e devidamente higienizados.

As análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia e Meio Ambiente (LEMA) – Setor de Análises Físico-químicas e Laboratório de Análises de Águas Rurais (LAAR) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), seguindo-se os procedimentos descritos no *Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater*. As metodologias e o limite de detecção de cada método são especificados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros e métodos empregados para as análises da qualidade da água percolada

Parâmetro	Método
Condutividade elétrica	Potenciométrico
Cor aparente	Colorimétrico
Fósforo total	Espectrofotômetro
pH	Potenciométrico
Sólidos totais	Gravimétrico
Turbidez	Nefelométrico

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as análises de fósforo total utilizou-se o método descrito por Murphy & Riley (1962), e as leituras foram feitas no espectrofotômetro de absorção atômica.

Os resultados das análises da qualidade das águas escoadas nos diferentes substratos foram comparados entre si, e com os padrões observados na NBR 15.527/07 (Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos) e no Manual “Conservação e Reúso da Água em Edificações” (ANA; FIESP; SINDUSCON-SP, 2005).

3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Para todas as análises estatísticas utilizou-se o Software R (R Core Team, 2015). O delineamento experimental em todas as etapas foi inteiramente casualizado (DIC). Os dados e os resíduos, foram verificados quanto às pressuposições de normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, com nível de significância de 5%. Apresentando normalidade, foram comparados pelos testes de comparação de médias de Tukey e/ou Scott-Knott. Em casos onde as pressuposições de normalidade não foram atingidas, optou-se pelos testes não paramétricos

de Kruskal-Wallis (KW), ou pela correlação de Spearman (ρ) para a análise estatística dos dados.

Os resultados obtidos quanto a retenção e armazenamento de água no teste em colunas, bem como as características físicas dos substratos e a cobertura vegetal, apresentaram normalidade nos dados, desta forma, foi realizada a comparação entre os tratamentos através dos testes de Tukey e Scott-Knott, com nível de significância de 5%.

Na fase em campo, os dados de retenção e escoamento não apresentaram normalidade, logo, optou-se pelo uso de testes não-paramétricos. Para a taxa de retenção, volume de chuva e período seco antecedente ao evento de chuva os dados foram analisados através da correlação de Spearman. Para os dados de escoamento optou-se pelo teste de Kruskal-Wallis (KW).

O coeficiente de correlação de Spearman, varia de -1 a 1, onde zero significa a ausência de correlação, e valores iguais a 1 ou -1 indicam correlação perfeita positiva ou negativa. As correlações podem ser classificadas como sendo fracas, moderadas e fortes. Neste trabalho, optou-se por classificar as correlações da seguinte forma: fraca $0,2 < \rho \leq 0,4$; moderada $0,4 < \rho \leq 0,7$ e forte $0,7 < \rho \leq 0,9$, possuindo o mesmo significado para os casos negativos ou positivos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 COMPOSIÇÃO DOS SUBSTRATOS

A presente seção apresenta os substratos obtidos após a mistura das matérias-primas, a porcentagem de cada componente utilizada e o aspecto visual de cada composição.

Após a seleção dos materiais, foi realizada a composição dos substratos em laboratório, através da homogeneização manual das diferentes componentes. As proporções utilizadas foram mensuradas em volume, de acordo com o recomendado pela (FLL, 2008). A Tabela 3 apresenta os dezesseis substratos formulados a partir de casca de arroz (carboniza e *in natura*), solo, vermiculita, resíduo da construção civil e vermicomposto, além das respectivas denominações.

Tabela 3 - Proporções volumétricas utilizadas na formulação dos diferentes substratos testados em laboratório

Substratos (ID)	CAC (%)	Solo (%)	Outros (%)	Substratos (ID)	CAN (%)	Solo (%)	Outros (%)
SC1	50	0	50	SN1	50	0	50
SC2	40	10	50	SN2	40	10	50
SC3	30	20	50	SN3	30	20	50
SC4	20	30	50	SN4	20	30	50
SC5	10	40	50	SN5	10	40	50
SOLO	0	100	0	SS6	0	50	50
SCOM	0	0	100 ⁽¹⁾	RCC	0	0	100 ⁽²⁾
CAC	100	0	0	CAN	100	0	0

ID: Identificação; CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; Outros: vermiculita (15%), resíduo da construção civil (20%) e vermicomposto (15%); (1): Substrato comercial a base de turfa (SCOM); (2): Tratamento composto apenas por resíduo da construção civil (RCC); SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SCn: substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada, SNn: formulado a partir de casca de arroz natural.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dos materiais utilizados, o vermicomposto foi o principal responsável pela adição da componente orgânica, recebendo especial atenção devido a sua variabilidade em comparação com as demais componentes. Segundo Kämpf (2005), os diferentes tipos de vermicompostos possuem propriedades variadas conforme a matéria-prima utilizada; em geral, possuem excesso de sais, elevados teores de matéria orgânica e alta densidade, sendo importante a realização de análises químicas para verificar as características específicas desse material (Apêndice A). Na

Figura 13 são apresentados os diferentes substratos obtidos através das distintas composições volumétricas.

Figura 13 - Ilustração das diferentes composições de substratos formuladas para uso em telhados verdes extensivos



CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 TESTE EM COLUNAS

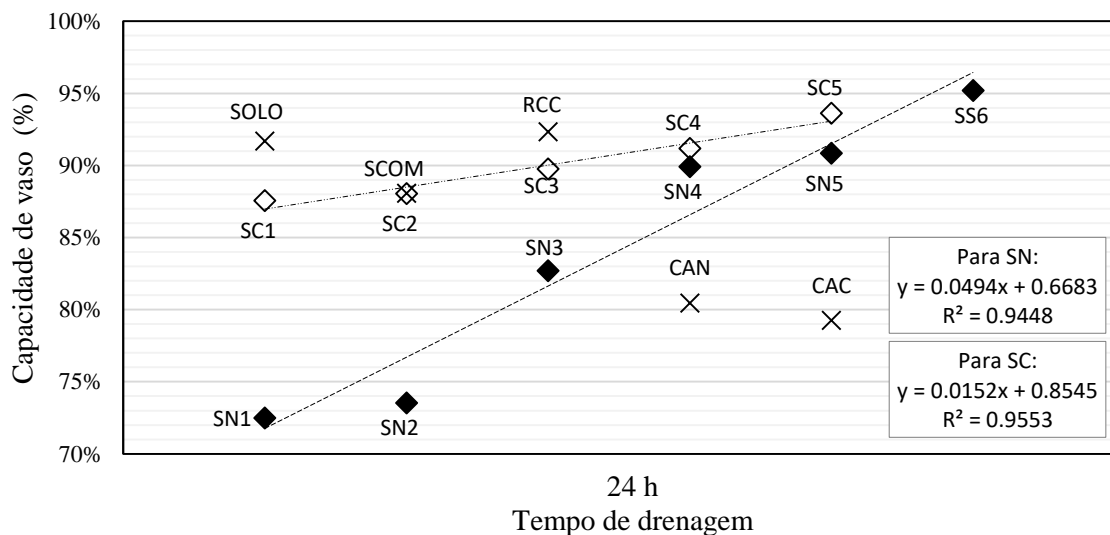
Seguindo-se os procedimentos descritos na metodologia, os diferentes substratos foram avaliados em ambiente laboratorial, através do teste em colunas de PVC, onde foram verificadas importantes características físicas das composições propostas, permitindo assim, a identificação de misturas adequadas e inadequadas para uso em telhados verdes extensivos.

Nesta seção, são apresentadas e discutidas propriedades como a capacidade de vaso ou capacidade de retenção e a capacidade de armazenamento de água.

4.2.1 Capacidade de vaso ou capacidade de retenção

Para a determinação da capacidade de vaso ou capacidade de retenção das diferentes composições de substrato, adotou-se um tempo de drenagem de 24 horas (Figura 14).

Figura 14 - Capacidade de vaso de cada substrato para 24 h de livre drenagem, pelo teste em colunas de PVC



Sendo: y a água remanescente e x o tempo de drenagem;

CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; RCC: Resíduo da construção civil; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se, através do ajustamento das retas da Figura 14, que à medida em que se diminuiu os teores de casca de arroz, aumentou-se a capacidade de vaso dos respectivos substratos, demonstrando assim, uma tendência linear nos teores de água das misturas, ou seja, quanto menor a proporção de casca de arroz maior é o teor de água mantido no substrato.

Composições com maiores proporções de casca de arroz carbonizada (SC1 e SC2) alcançaram resultados próximos ao substrato comercial a base de turfa (SCOM), e ligeiramente inferiores ao controle (SOLO). Com exceção de CAN, CAC, SN1, SN2 e SN3, os demais substratos encontraram-se numa faixa de retenção de água, entre 85% e 95% do volume retido inicialmente (Figura 14).

A comparação de médias foi realizada pelo teste de Scott-Knott, neste teste os agrupamentos estatísticos são auto-excludentes, ou seja, um mesmo tratamento não pode ser classificado em mais de um grupo, logo não há sobreposição dos tratamentos, como acontece no teste de Tukey, por exemplo, facilitando assim a comparação e a interpretação dos dados (Tabela 4). A atribuição dos grupos no teste de Scott-Knott dá-se em ordem decrescente, deste modo, valores maiores são alocados no grupo representado pela letra “A” ou “a”, valores inferiores no grupo representado pela letra “B” ou “b”, e assim respectivamente. Médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente ao nível de significância estipulado.

Tabela 4 - Teste de comparação de médias para a capacidade de vaso ($\text{dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$) dos diferentes tratamentos - desvio-padrão (SD) e coeficiente de variação (CV).

	SN1	SN2	SN3	SN4	SN5	SS6	CAN	SCOM
Méd.	0,149 (G)	0,243 (E)	0,312 (D)	0,346 (C)	0,366 (C)	0,404 (B)	0,093 (H)	0,434 (A)
SD	0,0047	0,0107	0,0120	0,0208	0,0095	0,0101	0,0098	0,0200
CV	3,55%	4,40%	3,85%	6,00%	2,59%	2,51%	10,47%	4,61%
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SOLO	CAC	RCC
Méd.	0,454 (A)	0,430 (A)	0,413 (B)	0,416 (B)	0,398 (B)	0,349 (C)	0,341 (C)	0,209 (F)
SD	0,0173	0,0223	0,0085	0,0020	0,0020	0,0121	0,0233	0,0083
CV	3,81%	5,18%	2,06%	0,47%	0,49%	3,46%	6,83%	3,99%

Médias seguidas por mesma letra não diferem estatisticamente entre si, ao nível de 5%, pelo teste de Scott-Knott. Méd: média; SD: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; RCC: Resíduo da construção civil; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Percebe-se, por meio do teste estatístico, que as maiores médias, quanto ao teor de água das misturas, foram encontradas nas composições SC1, SC2 e SCOM, alocadas no grupo “A”, enquanto que CAN foi a composição com menor teor de água retida (Grupo H). Isso porque, a alocação nos grupos dá-se pelo ordenamento das médias em ordem alfabética, ou seja, quanto maior forem os teores de água presente na amostra após 24h de livre drenagem, mais próximas as composições estarão do Grupo “A” e conforme esses teores forem diminuindo as composições são alocadas em grupos subsequentes, “B”, “C” “D” e assim sucessivamente.

Nota-se ainda, que as composições com 30%, 20% e 10% de casca de arroz carbonizada (SC3, SC4, SC5) e 0% de casca de arroz (SS6) não diferiram estatisticamente entre si, estando alocados no mesmo grupo estatístico (Grupo “B”), assim como SN4 e SN5 compostas por 20% e 10% de casca de arroz *in natura* (Grupo “C”).

Em um estudo realizado por Guerrini e Trigueiro (2004), utilizando casca de arroz carbonizada e biossólido, verificou-se que a medida em se elevou a porcentagem da casca de arroz carbonizada (CAC), diminui-se a capacidade dos substratos em manter, ao longo do tempo, a água absorvida durante o período de saturação. Tal afirmação, é verificada nesta pesquisa em algumas composições com elevada proporção de casca de arroz (*in natura* e carbonizada) através do monitoramento dos teores de água ao longo do tempo (Seção 4.2.2).

Vale ainda salientar que a determinação da capacidade de vaso está condicionada a inúmeros fatores, dentre eles, a técnica utilizada e o tempo de saturação e drenagem, estando sujeita a variações de acordo com os critérios de cada pesquisador. Além do mais, dada a importância de se conhecer, não somente a capacidade de vaso, mas também a capacidade de armazenamento de água dos diferentes substratos, as medições foram mantidas por um período de seis dias com o intuito de verificar o volume de água permanecido nas amostras.

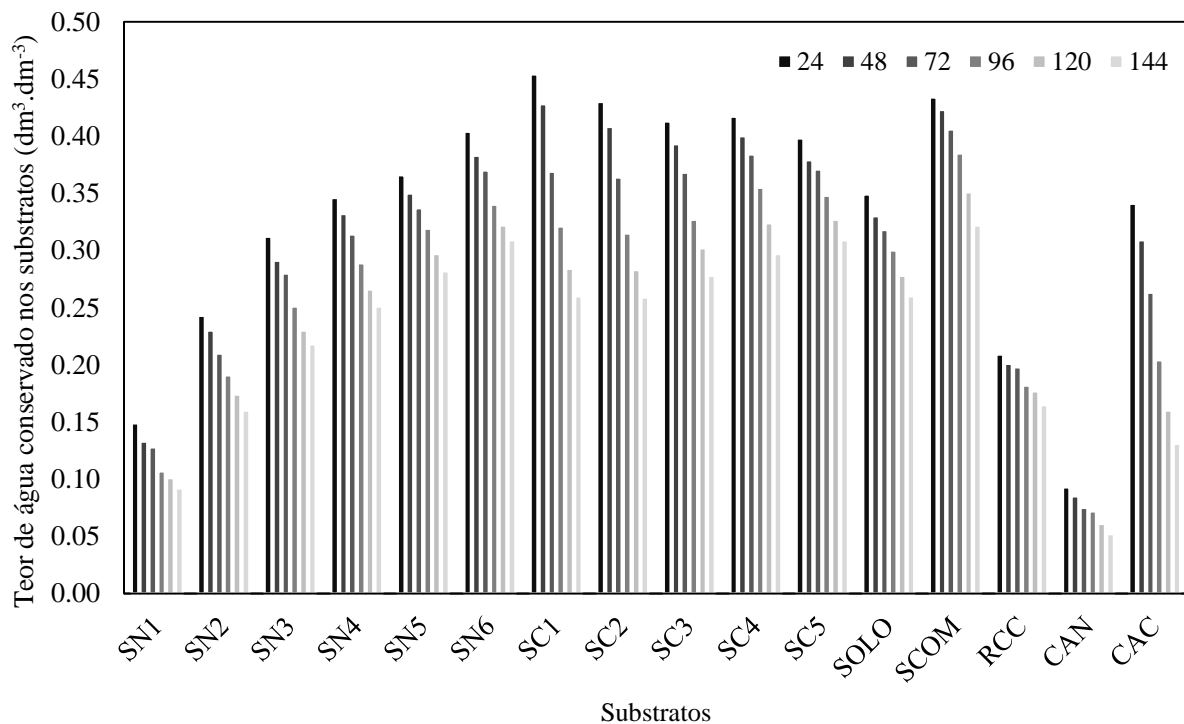
4.2.2 Retenção e armazenamento de água

Sendo a capacidade de armazenamento definida como a aptidão de um substrato em manter a água retida durante o período de saturação, o volume armazenado dependerá das características físico-químicas das misturas que irão determinar uma maior ou menor capacidade de armazenamento.

Os teores de água em cada substrato, durante o período de análise podem ser observados na forma gráfica através da Figura 15. Na Tabela 5 são apresentados os valores numéricos do teor de água presente nas diferentes composições (média das três repetições) ao longo do período de monitoramento. As medições foram realizadas em intervalos de 24h durante um

período de 144 horas, totalizando seis medições. A comparação de médias foi realizada pelo teste de Scott-Knott, onde as letras maiúsculas, na linha, comparam um mesmo tratamento em períodos de tempo distintos, enquanto que letras minúsculas, na coluna, comparam os diferentes tratamentos num mesmo período de tempo.

Figura 15 – Teor de água observado em cada composição através do teste em colunas de PVC durante as 24h, 48h, 72h, 96h, 120h e 144 h de livre drenagem



CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SN6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

De modo geral, para o armazenamento de água ao longo do tempo, observa-se, por meio do teste de Scott-Knott (Tabela 5), que apenas o tratamento CAC apresentou diferença estatística ao longo de todos os intervalos de tempo, demonstrando assim, uma maior perda de água ao longo do período de observação, enquanto que os demais tratamentos não diferiram, em pelo menos dois intervalos de tempos consecutivos.

Possivelmente, se o monitoramento tivesse continuado por um período de tempo superior a 144 h, verificar-se-ia a estabilização do teor de água em cada tratamento, e o conseqüente agrupamento das médias (mesmas letras), de acordo com as características de cada tratamento. Durante o período de avaliação este comportamento foi observado nos tratamentos

SN1 e SN2, onde não se verificou diferenciação significativa em relação a perda de água ao longo do tempo, a partir de 96 h de monitoramento. Este fato deve-se às características peculiares desses substratos, ocasionadas pela maior proporção de casca de arroz *in natura*, o que permite uma resposta mais rápida em relação ao teor de água armazenado ao longo do tempo, em relação as demais composições.

Tabela 5 - Teor de água restante nas amostras de substrato ($\text{dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$) ao longo do período de observação - média de três repetições

ID	24	48	72	96	120	144
SN1	0,149 Ag	0,133 Ag	0,128 Ag	0,107 Bg	0,101 Bg	0,092 Bg
SN2	0,243 Ae	0,230 Ae	0,210 Bf	0,191 Cf	0,174 Df	0,160 De
SN3	0,312 Ad	0,291 Bd	0,280 Be	0,251 Ce	0,230 De	0,218 Dd
SN4	0,346 Ac	0,332 Ac	0,314 Bd	0,289 Cd	0,266 Dd	0,251 Dc
SN5	0,366 Ac	0,350 Ac	0,337 Ac	0,319 Bc	0,297 Cc	0,282 Cb
SS6	0,404 Ab	0,383 Bb	0,370 Bb	0,340 Cc	0,322 Db	0,309 Da
SC1	0,454 Aa	0,428 Ba	0,369 Cb	0,321 Dc	0,284 Ed	0,260 Ec
SC2	0,430 Aa	0,408 Aa	0,364 Bb	0,315 Cc	0,283 Dd	0,259 Ec
SC3	0,413 Ab	0,393 Ab	0,368 Bb	0,327 Cc	0,302 Dc	0,278 Db
SC4	0,417 Ab	0,400 Bb	0,384 Ba	0,355 Cb	0,324 Db	0,297 Eb
SC5	0,398 Ab	0,379 Ab	0,371 Ab	0,348 Bb	0,327 Cb	0,309 Ca
SOLO	0,349 Ac	0,330 Bc	0,318 Bd	0,300 Cd	0,278 Dd	0,260 Dc
SCOM	0,434 Aa	0,423 Aa	0,406 Ba	0,385 Ba	0,351 Ca	0,322 Da
RCC	0,209 Af	0,201 Af	0,198 Af	0,182 Bf	0,177 Bf	0,165 Be
CAN	0,093 Ah	0,085 Ah	0,075 Ah	0,072 Ah	0,061 Bh	0,052 Bh
CAC	0,341 Ac	0,309 Bd	0,263 Ce	0,204 Df	0,160 Ef	0,131 Ff

Médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha (tempo) e minúscula na coluna (tratamentos) não diferem estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, com nível de significância de 5 %.

ID: Identificação; CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; RCC: Resíduo da construção civil; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

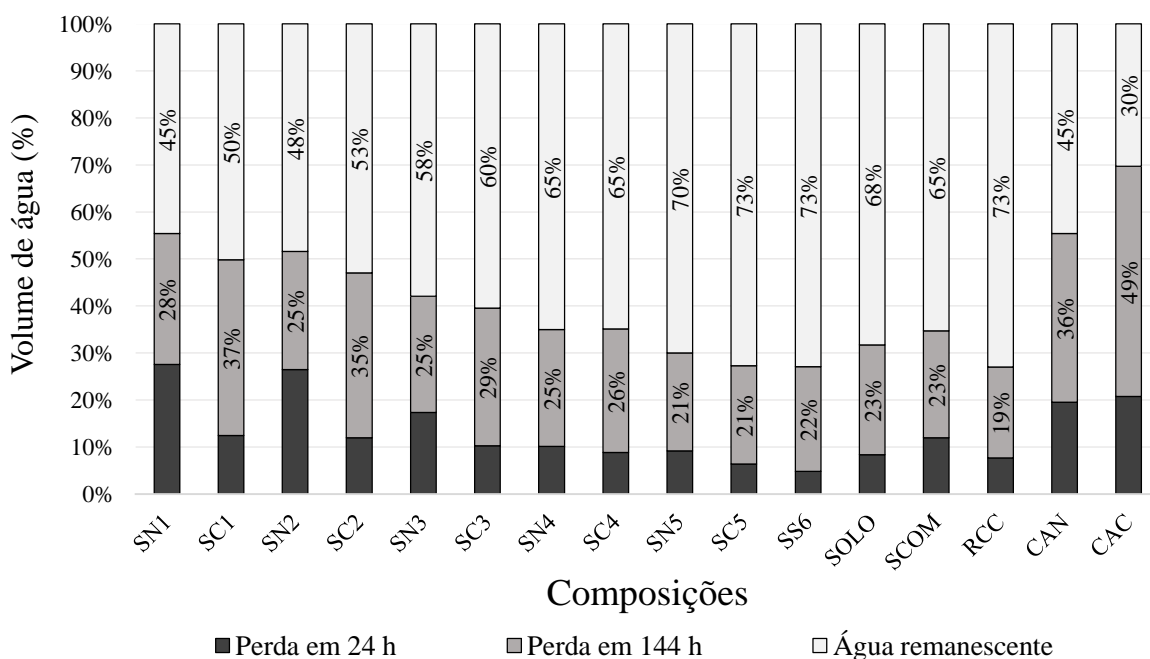
Em comparação com os demais substratos, SC5, SS6 obteve uma capacidade de inferior a SC1, SC2, SC3, SC4 e SCOM. O substrato RCC, também teve uma reduzida capacidade de retenção/vaso, sendo alocado no Grupo “g” pelo teste de Scott-Knott. Apenas os substratos SN1

(0,149 $\text{dm}^3.\text{dm}^{-3}$) e CAN (0,093 $\text{dm}^3.\text{dm}^{-3}$) foram inferiores quanto à capacidade de retenção em comparação à RCC (0,209 $\text{dm}^3.\text{dm}^{-3}$).

Comparando-se os diferentes substratos, em um mesmo intervalo de tempo (24h), observou-se que SC1, SC2 e SCOM apresentaram o maior volume de água retida (tempo 24h – grupo “a”), e diferiram estatisticamente de todas as demais composições. Ao final do período (144 horas), os maiores volumes são verificados nos tratamentos SS6, SC5 e SCOM demonstrando, assim, que os mesmos obtiveram uma melhor capacidade de armazenamento, apesar de não apresentarem os melhores valores de retenção (tempo zero).

A Figura 16 mostra a variação do volume de água perdido após 24 horas de livre drenagem (capacidade de vaso) e ao final do período de monitoramento (144 h), além do percentual conservado ao final das pesagens (6 dias). Observa-se que as composições SC5, SS6 e RCC foram as composições com melhor capacidade de armazenamento ao longo do período de análise, conservando 73% da água retida em 24 h de saturação.

Figura 16 - Variação do volume de água perdido e armazenado em cada composição



SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%); CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; RCC: Resíduo da construção civil; SCOM: Substrato comercial a base de turfa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, o resíduo da construção civil (RCC), composto fundamentalmente por tijolos moídos e argamassa, mostrou-se um material altamente eficiente no armazenamento de água e, conseqüentemente, uma alternativa adequada como material agregado na composição de substratos para uso em telhados verdes. Fato este, ratifica os resultados obtidos por Molineux, Fentiman e Gange (2009), que utilizaram como substrato para telhados verdes, tijolos triturados em comparação com outros materiais inertes, ambos acrescidos de uma componente orgânica, e verificaram a eficiência dos resíduos da construção civil na detenção da água das misturas.

Vale salientar que a utilização individual de RCC no teste em colunas, pode não representar a veracidade da eficiência do mesmo na capacidade de armazenamento de água quando misturado as demais componentes. Logo, recomenda-se a realização de investigações mais detalhadas a respeito da utilização desta componente na composição de substratos para uso em telhados verdes, variando-se, sobretudo, o volume adicionado às misturas. Além do mais, deve-se observar que a proporção de RCC na composição do substrato requer uma análise cuidadosa, pois o excesso de água na camada de substrato impede a amortização dos eventos de chuva vindouros. Além disso, o aumento da proporção de RCC eleva significativamente a carga sob a estrutura do telhado, podendo ocasionar possíveis danos a estrutura predial.

Os substratos, SC1 e SN1, compostos por 50% de casca de arroz, tiveram um comportamento semelhante, quanto à perda de água ao final das 144 h de monitoramento, no entanto, diferiram significativamente após 24 h de drenagem (Figura 16). Enquanto a composição SC1 (casca de arroz carbonizada) teve uma perda de 12%, SN1 (casca de arroz *in natura*) perdeu 28% do volume retido. Para os substratos a base de casca de arroz carbonizada, à medida em que se elevou a proporção de casca de arroz, o volume de água retido também aumentou. Em contrapartida, para os tratamentos com casca de arroz *in natura*, quanto menor a proporção de casca de arroz utilizada na composição do substrato, maiores foram os teores de água armazenados.

O substrato SN1 ($0,1490 \text{ dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$) apresentou uma diferença de retenção média de quase 38,6% em comparação a SN2 ($0,2430 \text{ dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$), demonstrando ainda, uma retenção média 63,09% inferior ao substrato SS6, e 57,35% em relação ao controle (SOLO). Os substratos SN3, SN4, SN5 e SS6 aumentaram a retenção de água à medida em que se diminuiu a proporção de casca de arroz e aumentou-se a de solo, possivelmente devido à diminuição dos macroporos e aumentando os microporos, responsáveis pela retenção de água (Tabela 5, coluna 24 h).

Para os substratos com casca de arroz *in natura* (CAN), observou-se a significativa redução do volume de água retido de acordo com o aumento do teor de casca de arroz, devido entre outros fatores ao tamanho das partículas e à composição química desse material (sílica, celulose, hemicelulose e lignina), responsável por conferir alta dureza e fibrosidade, diminuindo, por consequência, a retenção de água da mistura. A composição composta apenas por casca de arroz *in natura*, apresentou uma capacidade de retenção 73,3% inferior ($0,093 \text{ dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$) ao controle (SOLO), onde a retenção foi de $0,3494 \text{ dm}^3 \cdot \text{dm}^{-3}$.

Observa-se ainda que os substratos que receberam a mesma proporção de casca de arroz, diferindo apenas quanto ao tratamento do material - carbonizado ou *in natura* (SC1-SN1; SC2-SN2; SC3-SN3; SC4-SN4 e SC5-SN5) apresentaram um comportamento diferenciado quanto a capacidade de retenção e armazenamento de água.

Possivelmente, esta diferenciação entre substratos com teores de casca de arroz análogos, deva-se ao fato de que a carbonização é um processo químico de combustão incompleta (MEDEIROS, 1998) que destrói, em parte, o tecido vegetal pela ação do calor diminuindo, assim, a resistência contra a retenção de umidade ocasionada pela composição química da casca de arroz natural. A casca de arroz carbonizada possui microporosidades (MILLA et al., 2013) que melhoram a capacidade de retenção de água pelo material, o que possivelmente explica a alta capacidade de retenção de água da composição SC1 (50% de material carbonizado).

Outro fator importante, e que pode explicar a maior capacidade de retenção, refere-se ao tamanho das partículas presentes nas composições com casca de arroz carbonizada. Isto porque, a casca de arroz *in natura* tende a manter as partículas intactas devido à alta resistência desse material enquanto que a casca de arroz carbonizada quebra com muita facilidade, aumentando a variabilidade de partículas existentes no meio. Essa variabilidade no tamanho de partículas presentes na casca de arroz carbonizada proporciona um arranjo capaz de diminuir ou aumentar a porosidade da mistura e por consequência as demais características físicas responsáveis pela retenção de água de um substrato.

Muitas vezes o material carbonizado possui uma maior proporção de pó devido às quebras ocasionadas, entre outros fatores, pelo manuseio da casca de arroz. Nesses casos, essas micropartículas presentes no material acabam sendo as principais responsáveis pela retenção de água. O que explicaria a melhor capacidade de retenção das misturas com maiores proporções de casca de arroz carbonizada, visto que, originalmente, a adição deste material tem como propósito aumentar os espaços de aeração e não melhorar a capacidade de retenção de água.

Na Figura 16 pode-se observar ainda que os tratamentos CAC e CAN tiveram uma perda de água de 70% e 65%, respectivamente, ao final do período de observação. Valores similares foram verificados nos tratamentos SN1 e SN2, que devido ao alto teor de casca de arroz *in natura*, perderam respectivamente, 55% e 52% do volume total de água retido nas amostras. Esta baixa capacidade de retenção é explicada pelo elevado teor de CAN presente na composição dos substratos, ocasionada pelas características físicas e químicas desse material elucidadas anteriormente. Além do mais, os resultados obtidos indicam que estas composições não possuem características adequadas para uso em telhados verdes extensivos, pois a alta capacidade de drenagem ocasiona uma excessiva perda de água, compromete a sobrevivência da vegetação em períodos de estresse hídrico e, por consequência, a eficiência do sistema de telhados verdes.

Corroborando para essa decisão o trabalho de Zorzeto (2011), que identificou que a casca de arroz (*in natura*) acaba sendo inadequada para o cultivo de plantas de forma única, pois a alta porosidade e granulometria composta por partículas grandes, apesar de favorecerem a aeração do ambiente radicular, prejudicam a retenção de água, e logo inviabilizam o uso desse material sem a adição de condicionadores que melhorem tais características.

Das dezesseis composições utilizadas no teste em colunas, cinco apresentaram resultados insatisfatórios, como a baixa capacidade de retenção (SN1, SN2, CAN), armazenamento (CAC) ou excesso de peso (RCC) e, portanto, não são eficientes para uso em telhados verdes e, por consequência, foram descartadas das etapas sucessivas.

Considerando-se que um dos objetivos dos telhados verdes é reter o maior volume de água durante um evento de chuva, liberando o excedente ao longo do tempo, a uma velocidade tal, que permita ao sistema estar apto a receber o próximo evento, mas que mantenha uma quantidade mínima de água para manutenção da vegetação, os tratamentos SC1, SC2 e SCOM mostraram-se, num primeiro momento, mais adequados ao uso em telhados verdes, por apresentarem características desejáveis quanto à capacidade de retenção e armazenamento de água. As composições SC3, SC4, SC5, SN3, SN4, SN5, SS6 e SOLO, também apresentaram resultados satisfatórios após o teste em colunas de PVC e foram submetidas à caracterização físico-química e posteriormente levadas para a fase em campo.

4.2.3 Síntese

O teste em colunas de PVC serviu como ferramenta de seleção preliminar das composições com melhor capacidade de retenção e armazenamento de água, verificando que

os substratos cujas proporções de casca de arroz *in natura* foram elevadas (SN1, SN2, CAN), não obtiveram bons resultados no que tange a retenção de água pela mistura, ou no caso da composição CAC, composta unicamente por casca de arroz carbonizada, apesar da alta capacidade de retenção, o armazenamento de água ao longo do tempo não foi satisfatório. Em contrapartida, o excesso de água armazenada por RCC não é uma característica desejável para substratos utilizados em telhados verdes, considerando a função hidrológica destes na diminuição do pico de escoamento pluvial.

Posteriormente foram realizados testes em laboratório através de diferentes potenciais matriciais para se atestar a eficiência de cada composição selecionada, quanto à capacidade de retenção de água.

4.3 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DOS SUBSTRATOS

Após a seleção dos substratos com melhor capacidade de retenção hídrica, realizou-se a análise laboratorial das características físicas dessas composições (Apêndice B). Foram avaliadas características como, porosidade total, densidade úmida e seca, umidade atual, espaço de aeração, água facilmente disponível, água tamponante, água remanescente, água disponível e capacidade de retenção de água sob sucção de 10, 50 e 100 cm de coluna de água.

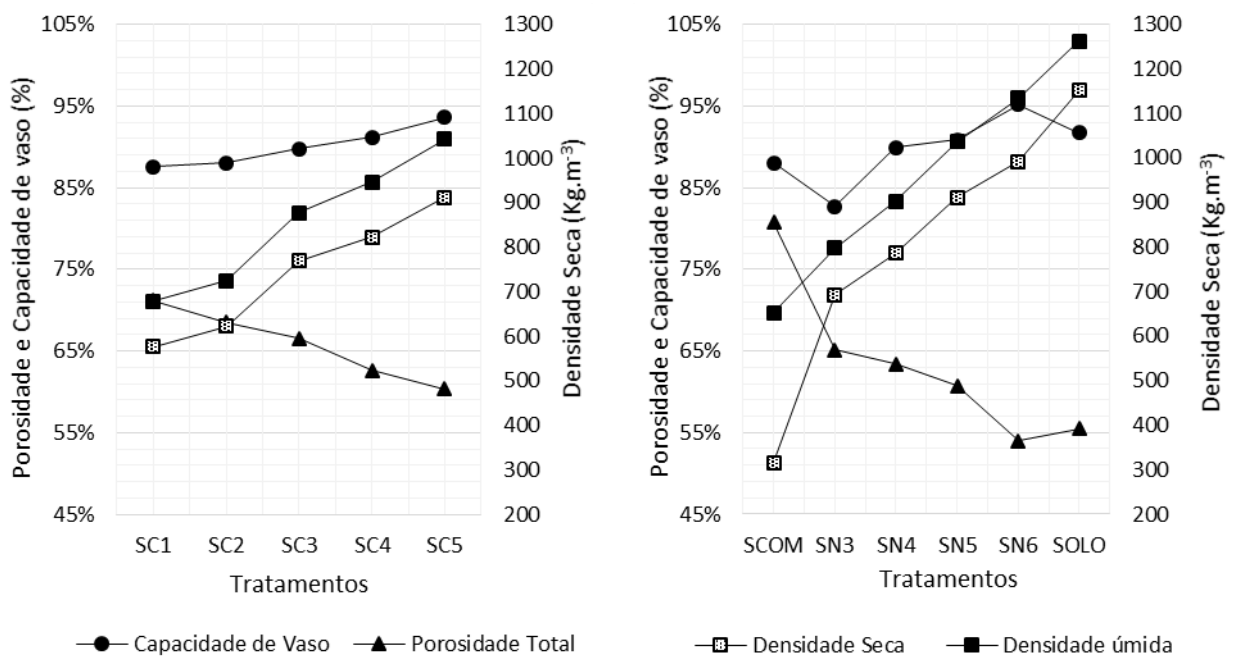
4.3.1 Porosidade total

Para a porosidade total, observou-se que os substratos que receberam maior proporção de casca de arroz (*in natura* e carbonizada) aumentaram a porosidade da mistura e, conseqüentemente, reduziram a densidade aparente. Isso ocorre porque, à medida em que se aumenta a proporção de materiais com baixa densidade eleva-se a macroporosidade das misturas, reduzindo assim a capacidade de vaso do substrato (Figura 17). O mesmo foi observado por Guerrini e Trigueiro (2004), que utilizaram casca de arroz carbonizada juntamente com biossólido e verificaram que o aumento da porosidade total está diretamente relacionado ao acréscimo de CAC, pois partículas maiores proporcionam um aumento nos macroporos da mistura e desta forma melhoram a capacidade de drenagem da água.

No entanto, a porosidade total de um substrato deve obedecer uma distribuição equilibrada de macroporos (ar) e microporos (água), essenciais à sobrevivência da vegetação, principalmente em telhados verdes extensivos, onde a boa capacidade de drenagem é desejável para que o sistema esteja apto para reter o maior volume possível de água precipitada no evento

de chuva sucessivo, mas também sendo capaz de manter quantidades mínimas necessárias à manutenção da vegetação. A normativa alemã (FLL, 2008), utilizada mundialmente como referência no planejamento, execução e manutenção de telhados verdes, não especifica valores desejáveis para a porosidade total, no entanto, faz recomendações quanto à granulometria do meio de crescimento, propriedade esta, diretamente relacionada à porosidade.

Figura 17 - Porosidade total (%), capacidade de vaso (%), densidade seca e úmida (Kg.m^{-3}) dos diferentes substratos



SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SN6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se (Apêndice B) que os substratos que receberam a mesma proporção de casca de arroz, independente da natureza carbonizada ou *in natura* (SC3-SN3; SC4-SN4; SC5-SN5) não apresentaram diferenciação estatística significativa em relação a porosidade total, pelo teste de Tukey com P-valor menor ou igual a 0,05. Os menores teores de porosidade total são observados nos tratamentos com menor proporção de casca de arroz, isto porque a medida em que se diminui a proporção de partículas maiores proporciona-se a acomodação das partículas menores e a consequente redução da porosidade (FERMINO, 2002).

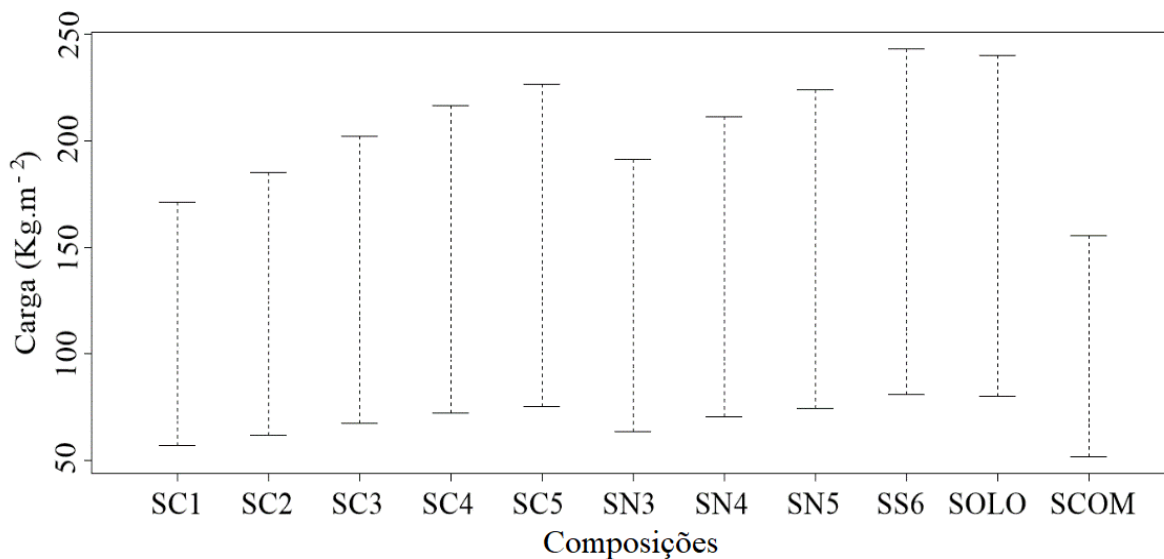
Este fator, reflete os resultados obtidos anteriormente no teste em colunas para o armazenamento de água dos substratos, confirmando os resultados obtidos, pois apesar dos

teores de macro e microporos não terem sido especificados, infere-se que o aumento das partículas presentes na mistura, decorrente da adição de casca de arroz, aumentam a macroporosidade e conseqüentemente diminuem a capacidade de armazenamento de água pelo substrato.

4.3.2 Densidade

A densidade é uma importante propriedade a ser considerada em substratos para uso em telhados verdes, principalmente devido à sobrecarga causada à estrutura predial, principalmente quando em condições de saturação. A normativa alemã, não estabelece valores limítrofes para esta propriedade, no entanto, algumas orientações, provenientes de estudos realizados em outros países, a exemplo da Inglaterra, orientam para valores entre 80 - 150 Kg.m⁻², enquanto que a Normativa Irlandesa recomenda que a carga sobre a estrutura predial, pode ser de até 240 Kg.m⁻² para telhados verdes extensivos (LENNEP; FINN, 2008; LIVINGSTONE; ROGERS; BISHOP, 2008). A faixa de peso de cada substrato para telhados verdes extensivos é apresentada na Figura 18. Para esta estimativa foi utilizada a condição de máxima saturação, com uma espessura mínima do meio de crescimento de 5 cm e máxima de 15 cm.

Figura 18 - Sobrecarga à estrutura predial para cada substrato quando em condições de saturação



SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que o substrato SS6 ultrapassou os valores estipulados pela Normativa Irlandesa, superando 240 Kg.m^{-2} . Tal resultado pode ser explicado, em função da composição dessa mistura, onde não foi utilizada a casca de arroz como material agregado - a qual diminuiu os valores de densidade dos demais substratos. Observa-se, ainda, que o substrato SS6 apresentou uma sobrecarga superior ao controle, composto apenas de solo, possivelmente decorrente da adição dos resíduos da construção civil.

Para os valores de densidade (seca e úmida), realizou-se o teste de comparação de médias entre os substratos (Apêndice B), verificando-se que as composições SC3, SC4 e SN4, não diferiram estatisticamente entre si, bem como, SC5 e SN5. Observou-se ainda, que SC2 não diferiu de SC1 e, tampouco, de SN3, sendo incerto precisar, pelo teste de Tukey a qual grupo, os dados, melhor se aproximaram.

Observa-se que o acréscimo de casca de arroz carbonizada (CAC) aos substratos proporcionou a diminuição na densidade e um aumento considerável no espaço de aeração (EA), facilitando dessa forma, a drenagem da água. O mesmo foi observado por Rota e Pauletti (2008) ao misturarem CAC à turfa, à medida em que se elevou as proporções deste material, aumentou-se também o espaço de aeração das misturas.

4.3.3 Teor de água

Os teores de água nos substratos são subdivididos quanto à capacidade de liberação. A água drenada entre as tensões de 10 e 100 kPa é denominada água disponível (AD), sendo que, entre 10 e 50 kPa encontra-se a água facilmente disponível (AFD), a água tamponante (AT) é o volume de água retido no substrato entre 50 e 100 kPa e o volume de água retido a pressões superiores a 100 kPa é denominada água residual ou remanescente.

A água disponível (AD) apresentou valores mais elevados nos substratos SCOM, SC1 (23,23% e 23,16%), reduzindo gradativamente, conforme reduziram-se as proporções de casca de arroz. Observa-se, no entanto, que o substrato SC2 (40% CAC, 10% solo, 15% vermicomposto, 15% vermiculita e 20% resíduo da construção civil), teve uma redução significativa nos valores de AD, apresentando um afastamento em comparação aos tratamentos com proporções de CAC semelhantes (Apêndice B). Essa diferenciação, pode ser observada em outras propriedades físicas, tais como o espaço de aeração (EA), e a água facilmente disponível (AFD). Logo, poder-se-ia inferir que essa discrepância seria atribuída às diferenças no processo de carbonização do material, no entanto, a CAC utilizada nas diferentes

composições proveio do mesmo processo de carbonização, logo, não foi possível precisar se tal distinção ocorreu devido às características singulares da combinação volumétrica 4:1 (quatro partes de CAC para uma de solo), ou a um possível erro laboratorial na análise da mistura.

É sabido, que substratos com baixa retenção de água facilmente disponível (AFD), geralmente apresentam excesso de macroporos, os quais favorecem a perda de água por gravidade após a saturação do material. O substrato SN3, com 30% de casca de arroz natural, apresentou 9,38% de AFD, sendo o menor valor observado entre as misturas, enquanto SC1 apresentou o maior teor de AFD, com 21,47%. Os demais tratamentos não diferiram estatisticamente entre si (Apêndice B).

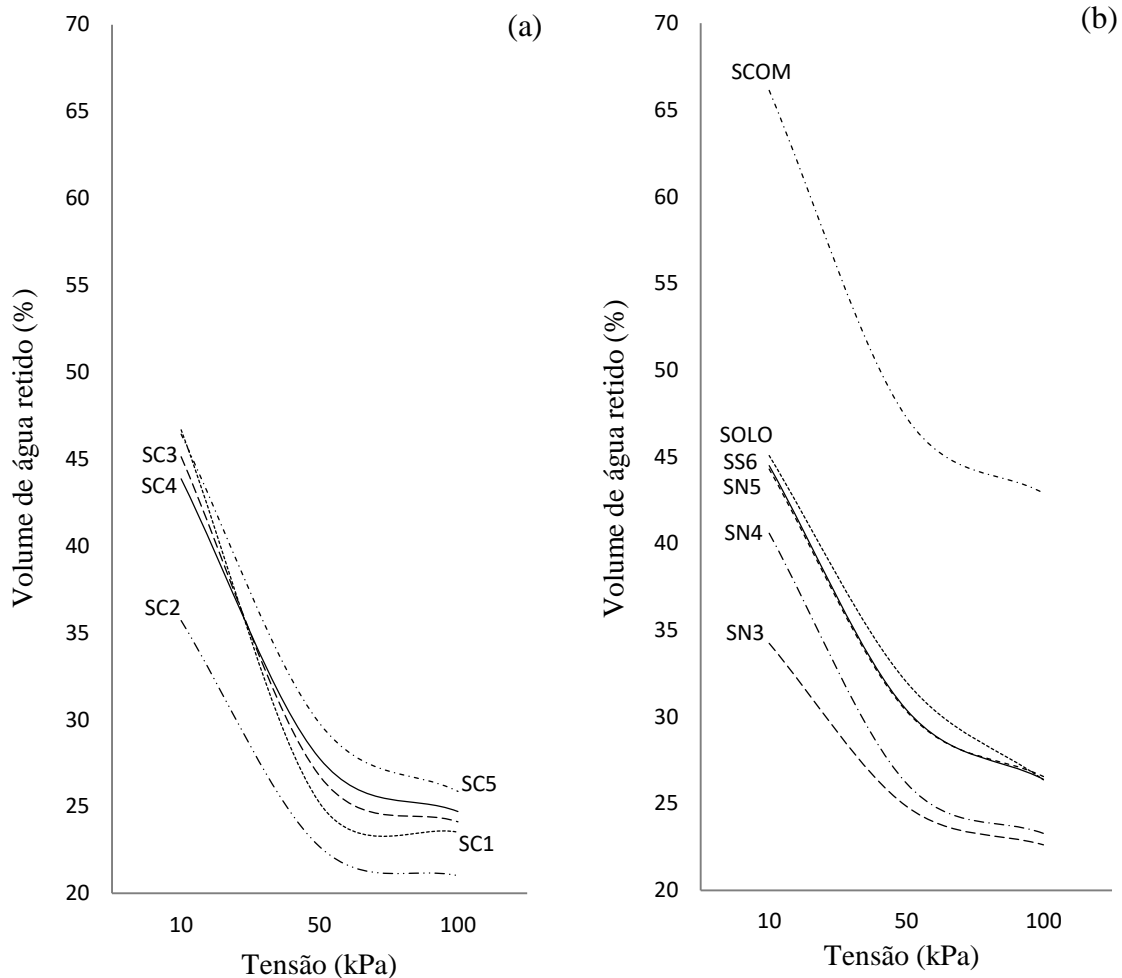
No entanto, quando os dados foram submetidos ao teste de Scott-Knott, (Apêndice C), com P-valor $\leq 0,05$, observou-se agrupamentos dos tratamentos: SC3, SC4, SC5, SCOM (Grupo b); SC2, SN4, SN5, SS6, SOLO (Grupo c); SN3 (Grupo d) e SC1 (Grupo a). Estes agrupamentos são realizados por ordem decrescente de médias, e considerando-se que valores maiores de AFD são desejáveis, o teste de Scott-Knott confirmou os resultados obtidos pelo teste de Tukey, onde SC1 apresentou os melhores valores para água facilmente disponível, sendo seguido pelos tratamentos SC3, SC4, SC5 e SCOM. Infere-se, portanto, que com exceção de SC2, o acréscimo nos teores de casca de arroz carbonizada proporcionou um aumento da AFD dos substratos.

Considerando-se que nem toda água retida pelo substrato estará disponível à vegetação, a capacidade de liberação da mesma será determinada através de diferentes tensões aplicadas ao substrato. As misturas foram submetidas ao teste de sucção sob tensões de 10, 50 e 100 kPa, para verificação da capacidade de retenção de água de cada tratamento (Apêndice B).

Através da aplicação de diferentes tensões obteve-se a curva de retenção de água de cada substrato (Figura 19). Observa-se que a capacidade de vaso obtida na mesa de tensão (10 kPa) diferiu em comparação com o teste em colunas (Figura 14), isto porque, segundo Casaroli e Van Lier (2008), diferentes metodologias tendem a apresentar diferentes estimativas devido às peculiaridades de cada método, e a padronização de tempos de drenagem ou potenciais matriciais, tendem a não apresentar uma correlação sistemática, visto que a capacidade de vaso é variável conforme os critérios de interesse.

Noya et al. (2017), testaram diferentes composições de substratos, com diferentes materiais, e verificaram que os tratamentos que continham casca de arroz carbonizada continham as características físicas e químicas desejáveis a um substrato para uso em telhados verdes. Os autores consideraram características essenciais, como água facilmente disponível, capacidade de armazenamento de água, espaços de aeração e densidade das misturas.

Figura 19 - Capacidade de retenção de água dos substratos formulados a partir de casca de arroz carbonizada - SC (a) e natural – SN (b) sobre tensões de 10 kPa, 50 kPa e 100 kPa



SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A absorção da água remanescente (AR) pelas plantas requer alto consumo de energia (KÄMPF, 2005), deste modo, substratos que contenham frações maiores desta variável são considerados inadequados para o cultivo da vegetação, pois o gasto energético para a obtenção de água poderia ser utilizado no desenvolvimento e manutenção das atividades vegetais.

Os menores valores para AR foram encontrados nos tratamentos SC1 (23,52%) e SC2 (21,02%), conseqüentemente, estas composições mostraram-se mais aptas para a referida propriedade. Em contrapartida, os substratos SC5, SN5, SS6, SOLO e SCOM superaram 25% de água remanescente (Apêndice B e C), mostrando-se menos aptos ao uso em telhados verdes.

O substrato comercial (SCOM) apresentou a maior porcentagem de água remanescente (42,9%) após submetido à tensão de 100 kPa.

O substrato composto por 50% solo, 20% resíduo da construção civil, 15% vermiculita e 15% vermicomposto (SS6), foi excluído da fase em campo por apresentar elevados valores de densidade, além de não diferir estatisticamente pelo teste de Scott-Knott (Apêndice C), dos substratos SN5 e SOLO, em variáveis como, água disponível (AD), água facilmente disponível (AFD), água remanescente (AR) e capacidade de retenção de água (CRA) sob sucção de 10, 50 e 100 kPa. Outro fator que contribuiu para a exclusão do mesmo na fase em campo, refere-se a não utilização da casca de arroz na composição da mistura, um dos objetivos desta pesquisa.

4.3.4 Granulometria

A distribuição granulométrica é uma das principais características físicas relacionada à retenção de água de um substrato, sendo também utilizada para entender a inter-relação entre condutividade hidráulica saturada, a disponibilidade de água às plantas e densidade aparente.

Para tanto, a quantificação do percentual de tamanho de partículas é uma importante ferramenta na escolha dos materiais a serem utilizados durante a formulação de um substrato, variando de acordo com a matéria-prima e a finalidade de uso da mistura. Outro fator importante e com possível alteração nos valores de granulometria refere-se ao tempo de agitação das peneiras. Em um estudo realizado por Zorzeto et al. (2014), verificou-se que ao variar o tempo de agitação das peneiras, houve uma alteração significativa na distribuição granulométrica de diferentes substratos, com ressalva para àqueles cuja matéria-prima condiz com a presente pesquisa – a casca de arroz.

De acordo com os autores, devido ao formato longitudinal da casca de arroz, ocorre um rearranjo das partículas durante tempos mais prolongados de agitação, deslocando o material para as peneiras de malhas inferiores, e por consequência, alterando a proporção retida em cada malha.

Como a análise da distribuição granulométrica seguiu a metodologia descrita na NBR 248 para materiais agregados (ABNT, 2003), o tempo de agitação foi estipulado em 3 minutos. Observa-se que os substratos avaliados apresentaram granulometrias distintas, variando, sobretudo, de acordo com a proporção de casca de arroz utilizada na mistura.

Nota-se, através da análise dos gráficos do Apêndice D e Apêndice E onde são apresentadas as curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas e de camada única, que os tratamentos SC1 e SC2, com maior volume de casca de arroz, têm

uma maior proporção de diâmetros médios das partículas entre 0,250 e 2,0 mm, o que aumentou a capacidade de retenção de água dos substratos, assim como observado por Griffin et al. (2017), onde verificou-se que substratos com uma maior proporção de partículas de tamanho médio (0,355-2,36 mm) aumentaram significativamente a retenção de água em comparação com granulometrias inferiores ou superiores a esta faixa.

Nessas composições há a predominância de frações maiores, grandes e intermediárias, o que favorece a aeração do ambiente radicular, mas pode prejudicar o armazenamento de água do material pelo maior volume de macroporos em comparação ao volume de microporos responsáveis por essa função.

Todos os tratamentos foram comparados, quanto à granulometria para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas ou de camada única. Percebeu-se que as misturas se adequaram melhor para uso em telhados verdes de camada única.

Ao se analisar individualmente os distintos tratamentos (Apêndice D), nota-se que apenas o substrato comercial Garden Plus® atendeu completamente aos limites de distribuição granulométrica estabelecidos pela diretriz alemã FLL, para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas.

4.3.5 Síntese

Observou-se que o aumento das proporções de casca de arroz carbonizada melhorou as propriedades físicas das misturas, melhorando a capacidade de retenção de água e drenagem e diminuindo a densidade dos substratos. No entanto, proporções muito elevadas de casca de arroz carbonizada diminuiriam drasticamente a capacidade de armazenamento de água, possivelmente, devido ao aumento dos macroporos presentes na mistura.

As composições que fizeram uso da casca de arroz *in natura*, tiveram os piores desempenhos para todas as propriedades físicas, com destaque para a baixa capacidade de retenção de água. Variáveis como água facilmente disponível, água disponível e água remanescente, não são especificadas pela normativa alemã, no entanto, são importantes propriedades que permitem analisar a aptidão de um substrato ao desenvolvimento da vegetação.

Apenas o substrato comercial esteve dentro da faixa estabelecida para a distribuição granulométrica das partículas, mesmo assim, atingiu os requisitos apenas para uso em telhados verdes de múltiplas camadas. Todas as demais composições apresentaram peculiaridades em

uma ou mais características analisadas, não sendo possível selecionar àquela, cujo conjunto de características melhor se adequa para uso em telhados verdes extensivos.

4.4 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DOS SUBSTRATOS SELECIONADOS

Na caracterização química dos substratos foram avaliados diversos parâmetros, no entanto, optou-se por dar maior ênfase àqueles considerados mais relevantes para o desenvolvimento da vegetação, entre eles, os macronutrientes, a matéria orgânica, a capacidade de troca de cátions e o potencial hidrogeniônico.

4.4.1 Matéria Orgânica

A matéria orgânica (M.O.) é fundamental para o desenvolvimento e manutenção da vegetação nos telhados verdes, no entanto, vale ressaltar que quanto maiores os teores de M.O., maior será o desenvolvimento das plantas, aumentando assim a necessidade de manutenções, bem como, tornando-as mais susceptíveis ao estresse hídrico, comum nos telhados verdes extensivos (BATES et al., 2013; NAGASE; DUNNETT, 2011; ROWE; MONTERUSSO; RUGH, 2006).

O aumento da biomassa vegetal ocasionado pela elevação nos teores de matéria orgânica, aumenta a necessidade hídrica da vegetação e por consequência torna-a mais vulnerável a falta de água. Logo, esse aumento nos teores de M.O. têm sido objeto de estudos que comprovaram a melhor fitossanidade da vegetação (NAGASE; DUNNETT, 2011; YIO et al., 2013; YOUNG et al., 2014), pois a M.O. contém praticamente todos os macronutrientes e micronutrientes necessários ao desenvolvimento das plantas.

Os teores de matéria orgânica (Apêndice A), mantiveram-se abaixo de 8%, conforme recomendado pela FLL para telhados verdes extensivos. Apenas o substrato comercial superou tal limite, com 19,4 %. Os valores obtidos vão de encontro à recomendação de Nagase e Dunnett (2011), que indicaram a adição de 10% de M.O. como ideal para substratos utilizados em telhados verdes extensivos, pois tal proporção permite um crescimento estável da vegetação, independente da baixa disponibilidade de água no meio. O mesmo estudo ressalta que teores próximos a zero, restringem consideravelmente o desenvolvimento da vegetação, enquanto que valores superiores a 25% podem ocasionar o excesso de biomassa e, conseqüentemente, a baixa resistência as condições de estresse hídrico citadas anteriormente.

Os tratamentos SC1 e SOLO, obtiveram valores de M.O. extremamente baixos, com relação aos teores de matéria orgânica, 2,8% e 1,7%, respectivamente, no entanto, o desenvolvimento na vegetação, que será apresentado na seção 4.5, não apresentou, diferença significativa em relação aos tratamentos com teores próximos ao estabelecido pela normativa alemã.

4.4.2 Capacidade de troca de cátions

É sabido que a restrição nos teores de matéria orgânica acaba refletindo na capacidade de troca de cátions (CTC) e, conseqüentemente, na disponibilidade de nutrientes às plantas. A CTC é a quantidade total de cátions permutáveis que um solo ou substrato pode adsorver, e esta é diretamente relacionada aos teores de matéria orgânica e materiais coloidais como a argila, por exemplo. No entanto, geralmente estão presentes em proporções muito baixas em substratos para uso em telhados verdes extensivos.

O maior valor para CTC foi observado no substrato comercial (SCOM) com 62,9, enquanto que as demais composições variaram entre 6,3 (SOLO) e 14,7 (SN3). Observa-se ainda (Apêndice A), com exceção de SC1, que a medida em que se aumentou a proporção de casca de arroz (carbonizada e *in natura*) aumentaram os teores de CTC das respectivas misturas.

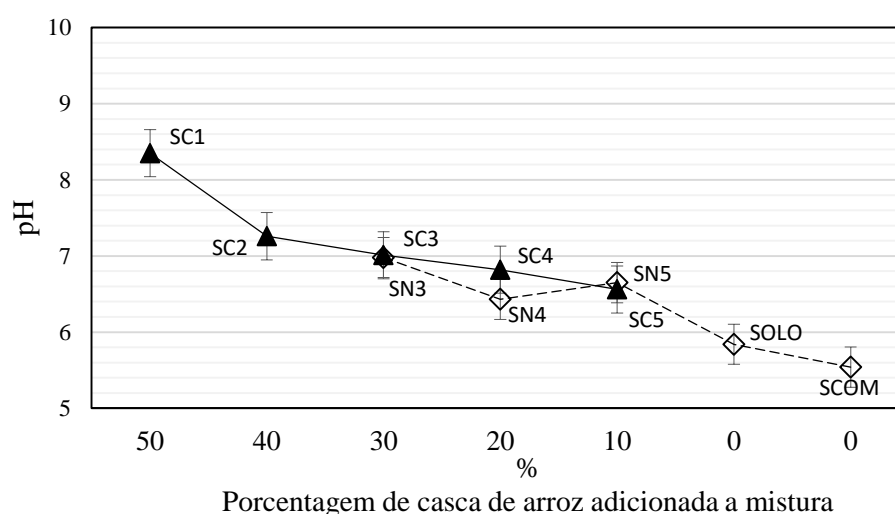
Considerando-se que a decomposição de materiais orgânicos aumenta a CTC do meio, à medida em que ocorrer a decomposição da casca de arroz, possivelmente, os valores de CTC serão alterados, porém, para conclusões mais confiáveis é necessário um acompanhamento das modificações das misturas por um período de tempo considerável, preferencialmente superior a um ano.

4.4.3 Potencial hidrogeniônico

Com relação ao potencial hidrogeniônico (pH) dos substratos, a FLL recomenda um pH entre 6,0 e 8,5. Dos tratamentos levados para a fase em campo, apenas o substrato comercial (SCOM) e o controle (SOLO) estiveram abaixo dessa recomendação, com 5,54 e 5,84, respectivamente. Possivelmente, com o aumento da idade dos substratos os teores de pH tenderão a diminuir naturalmente. Os demais valores de pH podem ser observados no Apêndice A.

As análises de pH das diferentes composições demonstraram que, ao se utilizar a casca de arroz carbonizada como material agregado, os valores de pH aumentaram conforme o acréscimo desse material à mistura. O mesmo não se aplica, aos substratos com casca de arroz *in natura*, onde observa-se que as composições SN3, SN4 e SN5, variaram os valores de pH independente do volume de agregado adicionado a mistura (30% - pH: 6,98; 20% - pH: 6,43 e 10% - pH: 6,65), enquanto SC1, SC2, SC3, SC4 e SC5 decresceram a medida em que se diminuiu a proporção de CAC (Figura 20).

Figura 20 - Variação do pH dos substratos em função da proporção de casca de arroz



CAC: Casca de arroz carbonizada; CAN: Casca de arroz natural; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SN6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

É importante notar que o pH é um fator de suma importância para um substrato, pois influencia diretamente, tanto na solubilidade, quanto na disponibilidade dos nutrientes às plantas, dessa forma, valores extremos tendem a prejudicar o desenvolvimento da vegetação. De acordo com Molineux, Fentiman e Gange (2009), a grande maioria das espécies utilizadas em telhados verdes não são tolerantes às condições extremas de acidez ou alcalinidade.

4.4.4 Macronutrientes

Para os teores de macronutrientes N, P, K, Ca e Mg (Tabela 6), aqueles que são absorvidos pela planta em maior proporção, observa-se que a adição de maiores volumes de

casca de arroz (carbonizada e *in natura*) elevou os teores de nitrogênio, com exceção da composição SC1. O substrato comercial a base de turfa apresentou as maiores concentrações de nitrogênio, assim como observado por Mieth (2016).

Tabela 6 - Concentração de macronutrientes nos substratos com diferentes proporções volumétricas de casca de arroz (carbonizada e *in natura*)

Tratamentos		N (%)	P (mg.dm ⁻³)	K (mg.dm ⁻³)	Ca (cmolc.dm ⁻³)	Mg (cmolc.dm ⁻³)
Carbonizada	SC1	0,14	370,3	592	5,304	3,617
	SC2	0,24	370,3	536	7,731	5,100
	SC3	0,21	383,5	560	6,921	5,010
	SC4	0,20	333,3	464	6,922	5,002
	SC5	0,18	326,4	460	6,385	5,020
Natural	SN3	0,260	420,5	600	7,707	5,448
	SN4	0,245	359,2	464	7,046	5,391
	SN5	0,235	320,1	460	6,859	4,292
	SS6	0,185	236,7	356	6,557	3,925
	SOLO	0,085	9,800	136	3,995	1,877
	SCOM	0,97	314,3	800	51,409	9,328

N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SS6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

A utilização de substratos com baixos teores de nutrientes proporciona um menor desenvolvimento da vegetação, no entanto, possibilita que as plantas sejam mais tolerantes à seca, permitindo assim a manutenção da vegetação às condições restritivas dos telhados verdes extensivos, pois plantas moderadamente estressadas aumentam o desenvolvimento das raízes e possibilitam a extração de água das camadas mais profundas do meio de crescimento. Deste modo, tem-se o uso mais eficiente do substrato, da água e dos nutrientes presentes na mistura (NAGASE; DUNNETT, 2011).

Elevados teores de macronutrientes não são indicados em substratos utilizados em telhados verdes, pois as altas concentrações podem aumentar o potencial de descarga desses elementos na água de escoamento, ocasionando o aporte de nutrientes e a consequente contaminação dos mananciais hídricos associados, bem como, o crescimento excessivo da vegetação, fator não desejável, já explanado anteriormente.

Os resultados obtidos para macronutrientes, permitem inferir, que as concentrações se encontram inferiores para nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio, em comparação com o substrato comercial a base de turfa. Apenas as concentrações de fósforo mantiveram-se próximas em todas as misturas.

A normativa alemã para telhados verdes extensivos (FLL, 2008) recomenda as seguintes concentrações para macronutrientes, N ($\leq 80 \text{ mg.dm}^{-3}$), P_2O_5 ($\leq 200 \text{ mg.dm}^{-3} = 458 \text{ mg.dm}^{-3}$ de P_2), K_2O ($\leq 700 \text{ mg.dm}^{-3} = 843,5 \text{ mg.dm}^{-3}$ de K_2) e Mg ($\leq 160 \text{ mg.dm}^{-3}$). Observa-se, que para os teores de fósforo, todas as composições mantiveram-se abaixo dos valores recomendados pela normativa, assim como os teores de potássio.

Os telhados verdes podem ser comumente fontes de fósforo e carbono orgânico dissolvido (BUFFAM; MITCHELL, 2015). Fatores como a vegetação utilizada, a profundidade do meio de crescimento e as características do substrato, bem como, a idade do telhado verde, desempenham um importante papel na regulação dos níveis de nutrientes carreados pelo escoamento. Sendo assim, a análise e controle dos teores de nutrientes presente nos substratos é extremamente importante para minimizar possíveis problemas decorrentes do excesso de tais elementos nas águas de escoamento pluvial.

4.4.5 Síntese

Em síntese, pode-se inferir que as características químicas de um substrato são extremamente importantes para o sucesso na implantação de um telhado verde. A matéria orgânica desempenha um papel essencial no desenvolvimento da vegetação, podendo disponibilizar todos os nutrientes necessários ao seu desenvolvimento, enquanto que a CTC regula a disponibilidade desses nutrientes às plantas. O pH e os macronutrientes acabam por ser potenciais limitantes ao desenvolvimento da vegetação, principalmente quando em condições extremas de excesso ou carência.

Dos substratos analisados, destacam-se os reduzidos teores de M.O. para as composições SC1 e SOLO, o pH abaixo da recomendação para as composições SCOM e SOLO e os teores de macronutrientes abaixo do limite máximo estabelecidos pela normativa alemã (FLL) em todas as composições de substrato formuladas.

No entanto, vale ressaltar que os parâmetros estabelecidos pela FLL podem não ser, necessariamente, os mais adequados para as condições locais, pois os valores recomendados pela normativa referem-se as condições ambientais alemãs, podendo não se aplicar as condições sul-brasileiras. Recomenda-se, portanto, a realização de novas investigações com o intuito de

otimizar os parâmetros estudados, através da comparação com um número maior de substratos já consolidados no mercado.

4.5 DESENVOLVIMENTO DA COBERTURA VEGETAL – FASE EM CAMPO

A cobertura vegetal é parte fundamental no sistema de telhados verdes, e irá interferir no volume do escoamento pluvial através dos processos de interceptação, retenção e transpiração (NAGASE; DUNNETT, 2012), processos esses, responsáveis pela resposta do sistema quanto à capacidade de retenção de água a um evento de chuva (BERRETTA; POË; STOVIN, 2014).

Outro importante fator refere-se ao aspecto paisagístico que os telhados verdes exercem no meio urbano, desta forma, os substratos utilizados devem ser capazes de fornecer as condições necessárias para o desenvolvimento e manutenção das plantas de forma a proporcionar um ambiente esteticamente agradável, podendo complementar ou contrastar com os diferentes estilos arquitetônicos existentes. No entanto, vale destacar, que para uma adequada conservação estética, é necessário uma manutenção periódica desses ambientes, considerando-se o ciclo de cada espécie vegetal e a necessidade, ou não, de intervenção humana.

Considerando-se que as variações entre os tratamentos ocorreram apenas no que tange as proporções de casca de arroz e solo, e que as demais componentes foram mantidas fixas, as diferenças obtidas quanto à cobertura vegetal (Apêndice F), estarão diretamente relacionadas a variação dessas proporções e/ou a natureza do material (carbonizada e *in natura*).

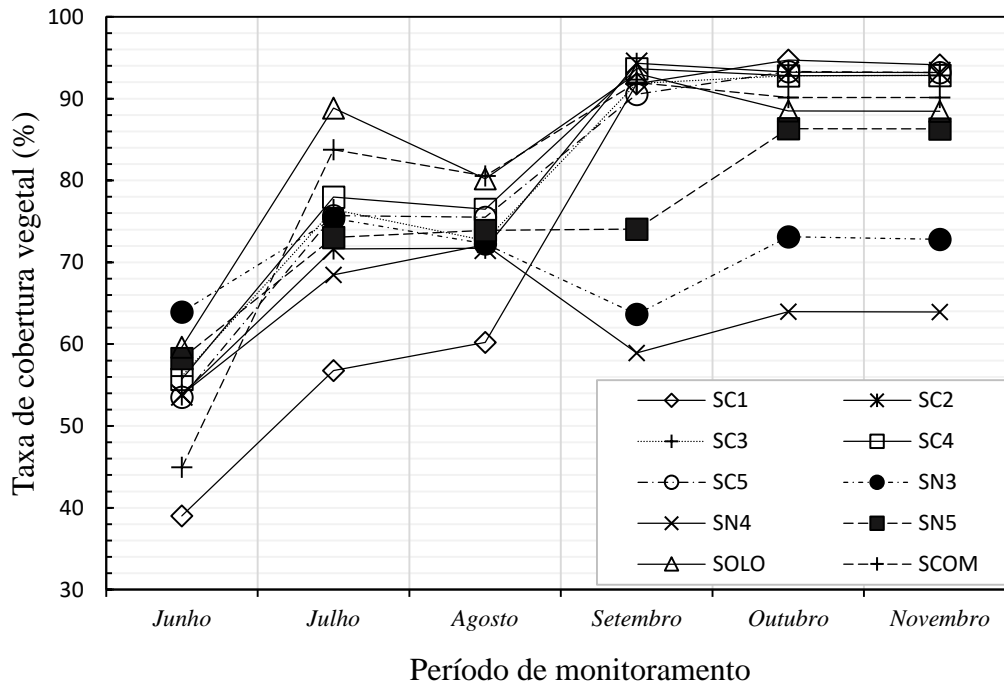
Quanto à taxa de cobertura vegetal da *Sedum rupestre* submetida às diferentes composições (Figura 21), observa-se que os substratos compostos por casca de arroz *in natura* tiveram um desempenho diferenciado, em comparação com as proporções análogas de casca de arroz carbonizada.

Nas composições SN3 e SN4, observa-se um decréscimo na taxa de cobertura vegetal no mês de setembro, a qual é retomada no mês de outubro devido à fase reprodutiva da *Sedum rupestre*. Contudo, apesar da recuperação da vegetação, a cobertura vegetal destes tratamentos ainda se manteve inferior àquela dos meses de julho e agosto.

Entre os meses de julho e agosto, houve um período de estiagem, o qual afetou consideravelmente o desenvolvimento da vegetação nas composições SOLO e SCOM, enquanto a vegetação das composições SC1 e SN4 manteve um crescimento progressivo, mesmo sobre condições hídricas restritivas. Nos demais substratos, a vegetação manteve-se

estável, com leve decaimento na taxa de cobertura vegetal em algumas composições (Figura 21).

Figura 21 - Taxa de cobertura vegetal dos tratamentos durante o período de monitoramento



SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SN6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do teste de Tukey, (Tabela 7) observou-se a variação da cobertura vegetal entre os substratos estudados. Este teste de comparação de médias, objetiva verificar se existe ou não diferença significativa quanto a cobertura vegetal desses substratos. Letras iguais para diferentes substratos indicam que não houve diferença estatística observada entre eles. Quando um mesmo substrato é seguido por mais de uma letra, entende-se que não foi possível precisar a diferenciação entre os grupos estatísticos (A, B, C, etc.) através do nível de significância proposto no teste de comparação de médias.

Nota-se que o tratamento SC1 apesar do aumento constante da vegetação, apresentou os menores valores em comparação com os demais substratos durante os três primeiros meses de monitoramento, no entanto, manteve um crescimento progressivo, inclusive no período de estiagem, tendo um crescimento acentuado entre os meses de agosto e setembro (Figura 21).

Os tratamentos compostos apenas por solo (SOLO) e por substrato comercial à base de turfa (SCOM), tiveram um comportamento semelhante durante todo o período. SCOM apresentou uma taxa de cobertura vegetal inferior durante os dois primeiros meses de monitoramento, contudo, não foram observadas diferenças significativas a partir do mês de agosto (Tabela 7).

Tabela 7 - Taxa de cobertura vegetal da *Sedum rupestre* durante os meses de monitoramento

Composições Meses	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5
	Taxa de cobertura vegetal (%)				
Junho - 2017	39.01 % C	53.81 % AB	56.09 % AB	55.71 % AB	53.52 % AB
Julho - 2017	56.78 % C	71.64 % ABC	76.44 % AB	77.96 % AB	75.71 % AB
Agosto - 2017	60.23 % B	71.73 % AB	72.65 % AB	76.51 % A	75.50 % A
Setembro - 2017	91.83 % A	94.33 % A	91.87 % A	93.65 % A	90.53 % A
Outubro - 2017	94.73 % A	93.22 % A	92.79 % A	92.79 % A	93.32 % A
Novembro - 2017	94.13 % A	93.18 % A	92.84 % A	92.85 % A	93.19 % A
Composições Meses	SN3	SN4	SN5	SOLO	SCOM
	Taxa de cobertura vegetal (%)				
Junho - 2017	63.94 % A	53.82 % AB	58.26 % AB	59.614 AB	44.94 % BC
Julho - 2017	75.37 % AB	68.46 % BC	73.03 % ABC	88.85 % A	83.77 % AB
Agosto - 2017	72.26 % AB	72.13 % AB	73.90 % AB	80.22 % A	80.54 % A
Setembro - 2017	63.65 % C	58.92 % C	74.07 % BC	93.08 % AB	91.98 % A
Outubro - 2017	73.12 % B	63.95 % B	86.33 % A	88.50 % A	90.14 % A
Novembro - 2017	72.80 % B	63.92 % B	86.32 % A	88.45 % A	90.13 % A

Taxas médias de cobertura vegetal seguidas por letras iguais na linha (composições) não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, com 5 % de significância. SOLO: Argissolo Vermelho-Amarelo (Horizonte A); SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%), SN6(0%).

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após o período de floração, ocorrido no mês de outubro, observa-se uma estabilização na taxa de cobertura vegetal, bem como, um leve decréscimo da mesma no mês de novembro, essa tendência à diminuição da cobertura vegetal deve-se, sobretudo à fase de senescência da planta.

Em suma, pode-se afirmar que o melhor desempenho da vegetação foi observado nos tratamentos com casca de arroz carbonizada (SC1, SC2, SC3, SC4 e SC5), com taxas de cobertura vegetal semelhantes ao controle (SOLO), enquanto que, para os tratamentos com casca de arroz *in natura*, quanto maior a proporção deste material adicionado a mistura, menor foi o desempenho da vegetação, fato este, pode ser observado nas ilustrações do Apêndice F.

Outro fato importante, refere-se à aparição de ervas daninhas, principalmente na fase inicial e final do período de monitoramento. Durante os primeiros meses, período onde a cobertura vegetal ainda era esparsa, observou-se nas composições a base de casca de arroz *in natura*, o aparecimento de plântulas de arroz, ocasionadas pela presença de grãos inteiros que não passaram pelo processo de beneficiamento. O mesmo não foi observado para as composições com casca de arroz carbonizada.

Na fase final de monitoramento, outros tipos de plantas invasoras emergiram, em todas as composições, independente da natureza do material utilizado (carbonizado ou *in natura*). Essas sementes, possivelmente, foram trazidas por pássaros, pelo vento, ou estavam presentes no solo utilizado na composição das misturas. Tal surgimento, durante o período de senescência da *Sedum rupestre*, demonstra a importância de uma adequada cobertura vegetal, em todos os meses do ano, para o controle de plantas indesejáveis e o correto funcionamento do sistema de telhados verdes, ressaltando ainda, a importância de se consorciar diferentes espécies de plantas com ciclos distintos.

4.6 CAPACIDADE DE RETENÇÃO E ESCOAMENTO EM CAMPO

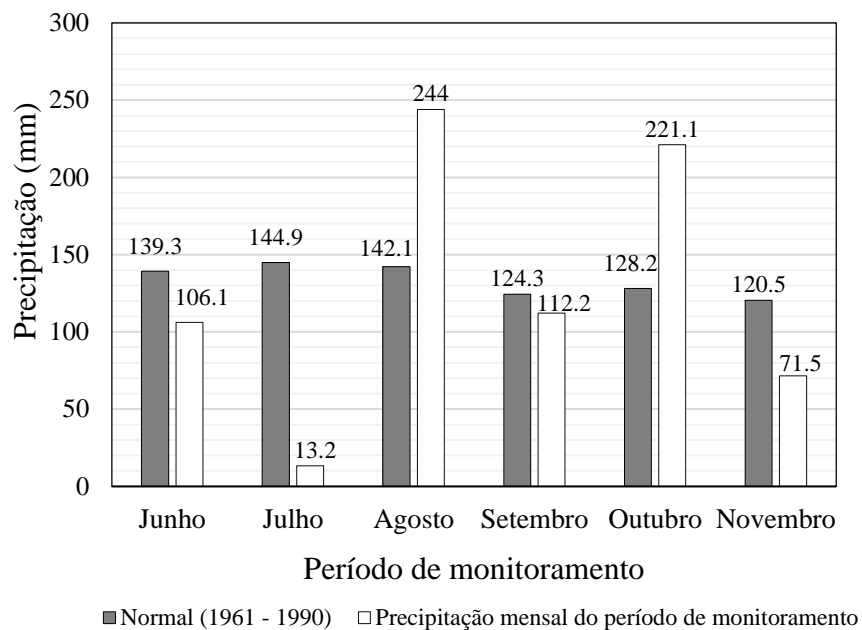
O meio de crescimento é essencial para o desenvolvimento da vegetação, mas também é responsável pela retenção da água da chuva, e a consequente diminuição do escoamento superficial (OBERNDORFER et al., 2007). Fatores como a espessura do meio de crescimento, a natureza do substrato, a cobertura vegetal e a idade do telhado verde, afetam consideravelmente a capacidade de retenção do sistema, além disso, variáveis climáticas como o volume da precipitação, período seco antecedente, temperatura e umidade do ar, intensidade e duração da chuva têm um importante papel na resposta do telhado verde à diminuição do volume escoado (BERNDTSSON, 2010).

Diferentemente do teste em colunas realizado em laboratório, no experimento em campo, as variáveis climáticas certamente interferiram na capacidade de retenção dos substratos, proporcionando uma maior ou menor taxa de evapotranspiração de acordo com as características de cada composição.

Durante o período de monitoramento, de junho a novembro de 2017, a precipitação acumulada para o período foi de 758,7 mm, com média diária de 4,22 mm; de acordo valores da normal climatológica de Santa Maria, a média diária é 4,36 mm com volume precipitado de 799,3 mm, para o mesmo período considerado neste estudo (RAMOS; SANTOS; FORTES, 2009).

Na Figura 22 são apresentados os volumes de chuva mensais registrados no pluviômetro instalado na área experimental, comparativamente às precipitações mensais normais (1961 a 1990), em Santa Maria - RS. Percebe-se um comportamento atípico acentuado, com precipitações inferiores às médias normais nos meses de julho e novembro, enquanto nos meses de agosto e outubro o volume precipitado superou os valores médios históricos.

Figura 22- Gráfico comparativo entre as precipitações mensais monitoradas (junho a novembro de 2017) e as precipitações mensais normais (1961 a 1990), em Santa Maria – RS



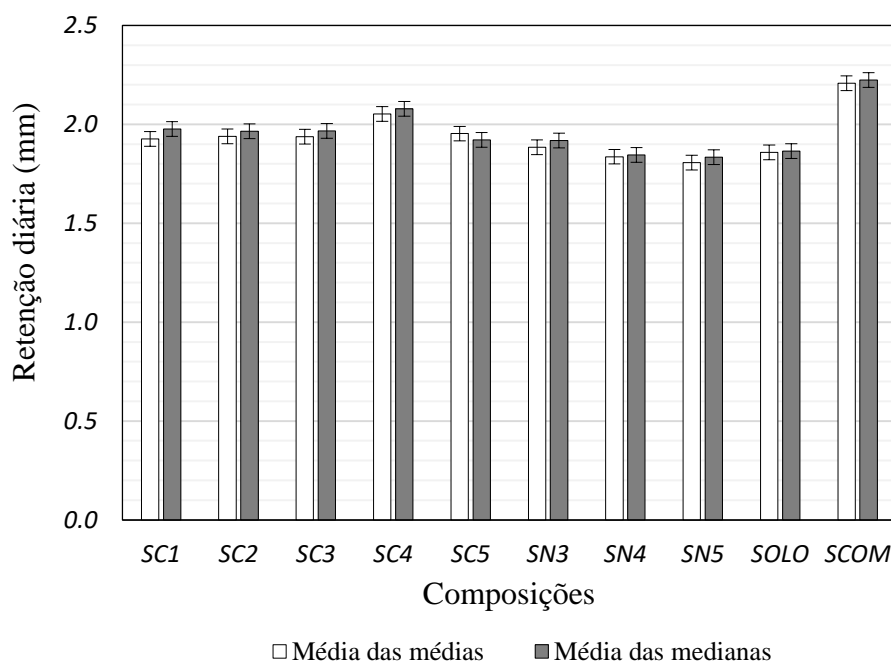
Fonte: Elaborado pelo autor

Quanto à retenção hídrica em condições de campo (Figura 23), observa-se que as composições SC4 e SCOM apresentaram melhor capacidade de retenção média diária durante o período de estudo (2,05 mm e 2,21 mm, respectivamente). Para fins desta análise, precipitações com volume inferior a 2 mm foram desconsideradas, pois pequenos eventos pluviométricos raramente geram escoamento significativo, além de não interferirem significativamente na capacidade de retenção de eventos maiores (FASSMAN-BECK; SIMCOCK, 2013).

A Figura 24 mostra a retenção mediana dos diferentes substratos durante o período de monitoramento. Os eventos de chuva ilustrados, representam o volume total de chuva acumulado em 24 h, dessa forma, eventos menores dentro das 24 h foram agrupados em um único evento. Na Tabela 8 são apresentadas as características destes eventos, o número de dias

secos anteriores a cada evento, a taxa de retenção dos diferentes substratos, além de algumas variáveis climatológicas.

Figura 23 - Retenção média diária dos substratos para período de observação – média de quatro repetições

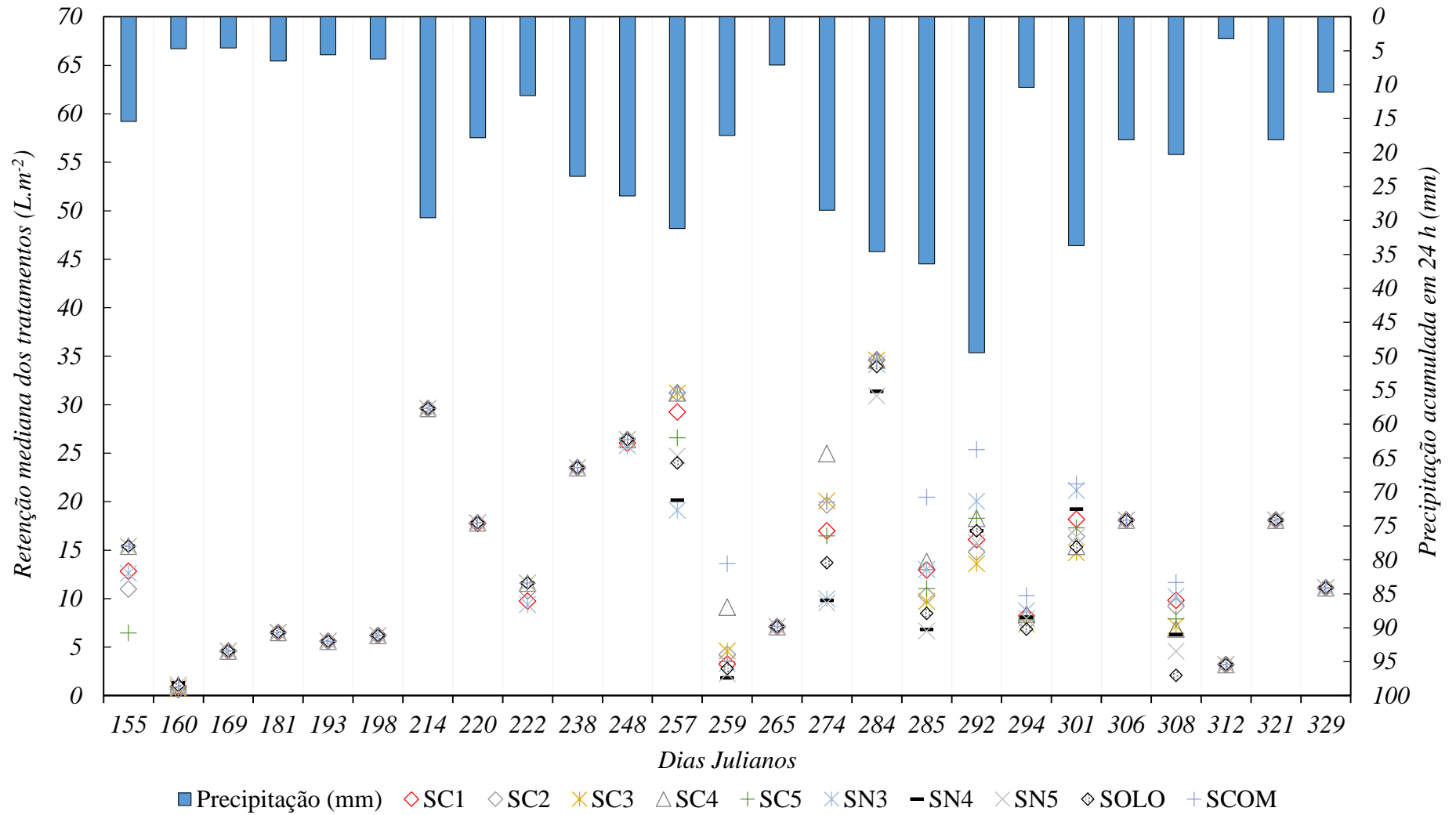


Fonte: Elaborado pelo autor.

Um evento extremo (146,7 mm), ocorrido entre os dias 11 e 12 de agosto de 2017, foi desconsiderado em razão do extravasamento de todos os recipientes coletores, pois como descrito na metodologia, o dimensionamento dos coletores levou em consideração chuvas de até 50 mm sem considerar a retenção do substrato, no entanto, cada composição possui características particulares quanto a retenção de água, podendo reter volumes superiores aos descritos.

A capacidade de retenção de um substrato dependerá do volume de chuva e do teor de umidade antecedente ao início do evento, além das condições ambientais e das características do meio de crescimento. O teor de umidade é controlado pelo processo de evapotranspiração, diretamente influenciado pelas condições climáticas locais.

Figura 24 - Retenção mediana dos tratamentos durante o período de monitoramento para cada evento de chuva – mediana de quatro repetições



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que precipitações com características semelhantes diferiram significativamente com relação à taxa de retenção (Tabela 8). Para os eventos 13, 18, 19 e 23, onde o volume de chuva variou entre 31,2 mm e 36,4 mm, houve uma variação considerável na taxa de retenção de cada substrato, isso porque, possivelmente, o número de dias secos associado às variáveis climatológicas determinou a resposta de cada composição aos eventos de chuva.

Os eventos 13 e 18 foram precedidos por um período seco de 8 e 9 dias, respectivamente, apresentaram uma taxa de retenção entre 61,83% (SN4) e 98,40% (SCOM) no primeiro evento, e 88,63% (SN5) e 100% (SC4 e SC5) no segundo. Para o evento 23, antecedido por seis dias secos e com volume de precipitação igual a 33,7 mm, a taxa de retenção variou entre 44,2% (SC4) e 65,66% (SCOM), valores consideravelmente inferiores aos eventos 13 e 18.

Considerando-se que o número de dias secos antecedentes ao evento 23 foi semelhante aos eventos 13 e 18, a diferenciação na taxa de retenção é explicada, possivelmente, pelo volume de precipitação dos últimos eventos (Eventos 21 e 22), que acumularam entorno de 60 mm de chuva. No evento 19, a baixa taxa de retenção em todos os substratos é totalmente explicada, pelo período seco igual a zero e também pelo volume considerável de chuva antecedente.

Através da análise dos gráficos do (Apêndice G), onde são apresentadas as relações entre o volume de chuva e a retenção de água em cada substrato, é possível perceber que quanto maior o volume de chuva precipitado, menor será o volume retido na camada de substrato. Fato este, explicado pela capacidade de retenção finita do substrato, ou seja, quanto maior o volume precipitado maior a possibilidade de saturação completa do meio, conseqüentemente, o volume precipitado após a saturação será transformado em escoamento.

Para avaliar de forma estatística como a retenção é influenciada pelo volume de chuva e pelo período seco antecedente em cada substrato, foram aplicados os testes de correlação de Pearson e Spearman. Os dados do monitoramento em campo não apresentaram normalidade, pelos testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, portanto aplicou-se o coeficiente de correlação de Spearman que considera a ordem dos dados e não o valor intrínseco dos mesmos, sendo adequado para verificar possíveis correlações entre as variáveis estudadas (BAUER, 2007). A Tabela 9 ilustra os coeficientes de correlação de Spearman entre a taxa de retenção e as variáveis, volume de precipitação e período seco antecedente.

Tabela 8 - Taxa de retenção média para cada evento de chuva durante o período de monitoramento

Eventos	Dias Julianos	Precip. (mm)	P.S. (Dias)	Rad. (Kj/m ²)	M.T.Má °C	T.P.S. °C	M.T. Mí °C	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SN3	SN4	SN5	SOLO	SCOM	Taxa de retenção (%)											
Evento 01	155	15,4	3	414,3	19,05	14,06	10,15	69,94	61,59	80,29	100	53,57	81,29	100	95,16	86,64	95,32												
Evento 02	159	73,9	3	109,9	16,5	14,58	13,36	-	-	-	41,1	-	-	34,26	-	-	-												
Evento 03	160	4,70	0	122,3	17,6	15,20	14,2	19,01	11,89	16,27	22,84	16,27	19,01	27,22	23,39	22,84	20,10												
Evento 04	169	4,60	8	380,6	19,96	15,28	10,46	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 05	181	6,50	11	471,4	21,83	17,5	12,16	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 06	193	5,60	11	461,1	20,89	15,26	11,12	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 07	198	6,20	4	390,7	25,57	20,12	15,1	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 08	214	29,6	15	526,8	22,51	15,22	8,26	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 09	220	17,8	5	518,6	19,37	13,41	8,47	88,85	100	98,70	100	100	93,35	100	88,15	100	100												
Evento 10	222	11,6	1	443,8	19,35	13,15	9,55	81,82	86,92	90,91	100	100	81,38	95,12	87,36	95,12	100												
Evento 11	238	23,5	12	554,1	21,19	15,86	10,91	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 12	248	26,4	9	589,9	24,83	20,64	15,38	97,37	100	100	100	100	92,21	100	98,73	100	100												
Evento 13	257	31,2	8	461,1	24,1	19,18	14,83	89,7	90,9	97,9	97,9	85,2	62	61,83	75,65	78,07	98,40												
Evento 14	259	17,5	1	273,4	16,9	14,4	13,05	15,2	25,5	22,5	44,6	30,5	19,46	10,64	27,25	15,2	68,4												
Evento 15	265	7,10	5	704,2	25,92	19,81	15,74	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 16	272	18,8	6	526,7	29,4	18,82	15,2	94,8	99,73	100	100	100	71,0	64,84	78,52	90,97	100												
Evento 17	274	28,5	1	543,5	23,82	18,55	15,0	57,6	68,9	70,6	80,2	57,2	37,91	33,85	30,6	46,94	72,66												
Evento 18	284	34,6	9	768,6	25,92	20,46	15,2	95,9	99,7	99,2	100	100	93,16	89,59	88,63	97,18	99,85												
Evento 19	285	36,4	0	139,4	23,7	17,35	15,2	36,9	30,7	26,7	38,5	30,4	36,97	19,24	19,52	25,24	52,38												
Evento 20	286	27,3	0	97,1	18,4	17,08	16,2	7,77	7,29	2,77	7,01	23,6	9,65	-	-	4,94	20,2												
Evento 21	292	49,5	5	755,7	26,68	19,18	13,82	33,1	29,9	26,8	36,4	41,3	38,64	32,24	30,79	36,04	49,91												
Evento 22	294	10,4	1	1215,5	25,3	20,21	15	76,2	71,3	72,1	81,7	79,2	83,18	79,23	77,49	65,13	94,81												
Evento 23	301	33,7	6	949,1	23,33	18,25	13,2	51,4	48,8	44,6	44,2	49,8	57,41	56,88	47,19	44,36	65,66												
Evento 24	306	18,1	4	1041,1	25,58	20,20	14,6	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 25	308	20,3	1	720,3	30,6	22,54	17,1	46,4	42,7	36,5	33,2	40,1	51,98	35,64	25,88	14,48	64,65												
Evento 26	312	3,20	3	1102,7	24,66	19,25	13,66	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 27	321	18,1	8	1067,9	29,71	22,69	15,75	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Evento 28	329	11,1	7	1064,4	27,62	20,19	12,18	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100												
Média	-	-	-	586,22	23,22	17,80	13,39	76,37	76,88	77,25	79,56	78,04	75,15	75,58	76,70	74,93	85,27												

Ev.: Evento; P.S.: período seco antecedente ao evento de chuva, em dias; (-) Não foi possível determinar a taxa de retenção devido à perda dos dados; T.P.S.: temperatura média do período seco; M.T.Má: média das temperaturas máximas do período seco; M.T.Mí: média das temperaturas mínimas do período seco; Precipitações inferiores a 2 mm foram desconsideradas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Seguindo-se a classificação proposta neste trabalho, tem-se uma correlação fraca para $0,2 < \rho \leq 0,4$; moderada $0,4 < \rho \leq 0,7$ e forte $0,7 < \rho \leq 0,9$. O sinal negativo indica que as variáveis variam em sentido oposto, ou seja, as categorias mais elevadas de uma variável estão associadas a categorias mais baixas da outra variável.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Spearman para a taxa de retenção, volume de chuva precipitado e período seco antecedente

Tratamentos	Precipitação x Taxa de retenção		Período seco x Taxa de Retenção	
	ρ^*	P-valor	ρ	P-valor
SC1	-0,41092	0,03323	0,695135	$5,72 \cdot 10^{-05}$
SC2	-0,38534	0,04715	0,691592	$6,46 \cdot 10^{-05}$
SC3	-0,36786	0,05905	0,723191	$2,03 \cdot 10^{-05}$
SC4	-0,42114	0,02563	0,640999	0,000238
SC5	-0,32307	0,10020	0,685381	$7,98 \cdot 10^{-05}$
SN3	-0,45581	0,01687	0,657612	0,000193
SN4	-0,47080	0,01319	0,596912	0,001013
SN5	-0,44411	0,02303	0,636493	0,000473
SOLO	-0,40930	0,03400	0,681819	$8,99 \cdot 10^{-05}$
SCOM	-0,42113	0,02870	0,624026	0,000505

* Coeficiente de correlação de Spearman; SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%); SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: composição com 100% de Argissolo Vermelho-Amarelo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que, para a correlação entre volume da precipitação e taxa de retenção, todos os tratamentos, com exceção de SC3 e SC5 apresentaram P-valores menores que 0,05, logo possuem correlação significativa, verificada tal pressuposição, pode-se inferir com base nos resultados obtidos através da análise de correlação de Spearman (ρ) com 5 % de significância, que para os tratamentos SC3 e SC5, a correlação é classificada como fraca ($\rho = -0,36$ e $-0,32$, respectivamente), enquanto que para todas as demais composições há uma correlação negativa-moderada, ou seja, não há correlação significativa forte entre o volume precipitado e a taxa de retenção. No entanto, por ser uma correlação negativa, pode-se inferir que quanto maior o volume precipitado, menor será a taxa de retenção, fato este, observado também por Wang, Tian e Zhao (2017), e verificado na taxa de retenção no Evento 21, com precipitação total de 49,5 mm e taxa de retenção variando entre 26,8% (SC3) e 49,91% (SCOM).

Para a correlação entre período seco antecedente e taxa de retenção, observa-se uma correlação positiva-forte para o tratamento SC3 ($\rho = 0,723$), e positiva-moderada para os demais tratamentos, ou seja, quanto maior o período seco, maior será a capacidade de retenção dos

substratos e conseqüentemente há um aumento na taxa de retenção dos mesmos, enquanto que períodos secos curtos indicaram uma menor capacidade de retenção (correlação positiva) (POË; STOVIN; BERRETTA, 2015; TASSI et al., 2014).

Há uma maior evidência de relação entre a taxa de retenção e o período seco antecedente, ou seja, o período seco influenciou mais que o volume da precipitação: para período seco de forma direta, (coeficiente positivo - maior o período seco, maior a taxa de retenção) e para o volume de precipitação de forma inversa, (coeficiente negativo - maior a precipitação, menor a taxa de retenção).

É notório, que o volume da precipitação também tem influência na taxa de retenção, no entanto, não de forma tão evidente quanto o período seco antecedente ao evento de chuva. As correlações entre o volume de precipitação e a taxa de retenção são consideradas moderadas-fracas, logo, infere-se que, de fato existe uma correlação entre estas variáveis, mas esta não é tão evidente/forte quanto o período seco antecedente.

O teor de umidade do substrato, no início de um evento de chuva, será um valor entre a capacidade de recipiente e o teor mínimo de umidade da mistura, também denominado ponto de murcha (FASSMAN e SIMCOCK, 2013; STOVIN; VESUVIANO; KASMIN, 2012). Fatores como, a variabilidade nas características das misturas, e a conseqüente variação na umidade antecedente ao evento de chuva tendem a explicar a variação à resposta de retenção dos diferentes tratamentos.

A evapotranspiração é um parâmetro chave que influencia a capacidade de retenção de águas pluviais e, portanto, o desempenho hidrológico, dos telhados verdes (BERRETTA; POË; STOVIN, 2014), sendo um dos fatores responsáveis pela restauração da capacidade de retenção de um substrato, e estando condicionada ao período seco antecedente. Outros fatores, também contribuem para a resposta do substrato ao evento de chuva, pois a evapotranspiração será alterada, dependendo das condições meteorológicas locais, ou seja, para o mesmo nível de umidade inicial e duração do período seco, os níveis de umidade final podem variar e, conseqüentemente, a capacidade de retenção (WONG; JIM, 2017).

É de conhecimento que substratos com maior porosidade total, tendem a perder água mais facilmente, pois o aumento dos espaços de aeração facilita a drenagem da água armazenada nos macroporos quando em condições de saturação. Desta forma, tenderão a drenar mais facilmente a água retida durante um evento de chuva e, conseqüentemente, estarão aptos a receber o evento sucessivo, fato este observado no tratamento SC1. No entanto, para SCOM onde a porosidade da mistura ultrapassa 80% o mesmo não pode ser inferido, isso porque a

turfa, principal componente de SCOM possui características específicas que conferem a mistura alta porosidade e capacidade de armazenamento de água simultaneamente.

Com base no valor médio da taxa de retenção (Tabela 8), obteve-se o desempenho dos substratos para o período de monitoramento, os quais são apresentados em ordem decrescente: SCOM (85,27%); SC4 (79,56%); SC5 (78,04%); SC3 (77,25%); SC2 (76,88%); SN5 (76,7%); SC1 (76,37%); SN4 (75,58%); SN3 (75,15%) e SOLO (74,93%). Assim como na retenção média diária (Figura 18), os tratamentos SCOM e SC4 apresentaram melhor desempenho quanto ao volume de água retido pelo sistema e, conseqüentemente, apresentaram os menores volumes de precipitação convertida em escoamento superficial. A retenção média de todos os substratos foi semelhante aos resultados encontrados na literatura: entre 49-80% para Fassman-Beck e Simcock (2013); e 62%, em média, para Tassi et al. (2014).

No entanto, é importante destacar que a utilização de valores médios acaba sendo pouco recomendável, pois a média aritmética é uma medida de tendência central que considera todas as medições e que tende a maximizar o minimizar a resposta observada.

Como a taxa de retenção tende a ser altamente variável, devido, principalmente ao período seco antecedente, a utilização de valores médios pode gerar resultados falaciosos, que não representam de fato, a real capacidade de retenção dos substratos estudados. Dessa forma, recomenda-se que pesquisas futuras busquem desenvolver uma função que considere, entre outras variáveis, as características climáticas peculiares de cada região para gerar resultados confiáveis sem a necessidade de utilização da média aritmética.

Do ponto de vista hidrológico, é comum expressar a influência dos telhados verdes no controle quantitativo do escoamento por meio do coeficiente de escoamento (Tabela 10). Coeficientes menores indicam que uma maior parcela da chuva ficou retida pelo sistema, principalmente na camada de substrato, demonstrando assim, uma boa eficiência no controle quantitativo, enquanto que valores próximos a um (1), indicam que a maior parte do volume precipitado virou escoamento, não sendo retido, armazenado ou interceptado pelo sistema (TASSI et al., 2014).

Chuvas maiores tendem a gerar maiores volumes de escoamento enquanto eventos com precipitações inferiores a 10 mm resultam pouco ou nenhum escoamento (STOVIN, et al., 2015), no entanto, quando o período seco antecedente ao evento de chuva é curto, o coeficiente de escoamento, tenderá a ser mais elevado. Fato este, comprovado anteriormente pela correlação de Spearman para cada composição.

Tabela 10 - Coeficiente de escoamento (c) dos diferentes tratamentos para cada evento de chuva durante o período de monitoramento

Eventos	Tratamentos									
	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SN3	SN4	SN5	SOLO	SCOM
Evento 01	0,17	0,29	0,00	0,00	0,58	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 02	-	-	-	0,59	-	-	0,69	-	-	-
Evento 03	0,81	0,88	0,85	0,77	0,83	0,82	0,72	0,77	0,78	0,81
Evento 04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 10	0,16	0,07	0,00	0,00	0,00	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 12	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 13	0,06	0,00	0,00	0,00	0,15	0,39	0,35	0,21	0,23	0,00
Evento 14	0,81	0,76	0,74	0,48	0,80	0,81	0,90	0,87	0,84	0,22
Evento 15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 16	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,23	0,35	0,24	0,04	0,00
Evento 17	0,40	0,31	0,30	0,12	0,42	0,65	0,66	0,66	0,52	0,30
Evento 18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,09	0,11	0,02	0,00
Evento 19	0,64	0,72	0,73	0,62	0,70	0,64	0,81	0,82	0,77	0,44
Evento 20	0,92	0,95	0,99	0,92	0,85	0,92	-	-	0,95	0,88
Evento 21	0,68	0,70	0,73	0,63	0,63	0,60	0,66	0,68	0,66	0,49
Evento 22	0,21	0,28	0,29	0,19	0,25	0,16	0,22	0,24	0,34	0,01
Evento 23	0,46	0,51	0,56	0,54	0,49	0,37	0,43	0,51	0,54	0,35
Evento 24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 25	0,52	0,55	0,65	0,66	0,61	0,50	0,69	0,78	0,90	0,43
Evento 26	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Evento 28	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Média	0,217	0,223	0,216	0,197	0,234	0,242	0,243	0,227	0,244	0,146

(-) Não foi possível determinar o coeficiente de escoamento devido à perda dos dados; Coeficientes próximos a zero indicam que a maior parte do evento foi interceptado, absorvido e armazenado pelo substrato; próximos a 1 indicam pouca eficiência de retenção; SC: Substrato formulado a partir de casca de arroz carbonizada nas proporções volumétricas de SC1(50%), SC2(40%), SC3(30%), SC4(20%) e SC5(10%); SN: Substrato formulado a partir de casca de arroz natural nas proporções volumétricas de SN1(50%), SN2(40%), SN3(30%), SN4(20%), SN5(10%); SCOM: Substrato comercial a base de turfa; SOLO: composição com 100% de Argissolo Vermelho-Amarelo.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se analisar o valor médio do coeficiente de escoamento ao longo do período de monitoramento, tem-se que os coeficientes mais próximos a zero foram obtidos nas composições SCOM (0,146) e SC4 (0,197), seguidos, respectivamente, por SC3 (0,216), SC1, (0,217), SC2 (0,223), SN5 (0,227), SC5 (0,234), SN3 (0,242), SN4 (0,243) e SOLO (0,244).

Percebe-se que, para o coeficiente de escoamento, todas as composições que utilizaram diferentes proporções de solo misturado aos demais agregados (casca de arroz, vermiculita, vermicomposto e resíduo da construção civil) apresentaram coeficientes de escoamento superiores ao controle (SOLO), composto unicamente por solo local. Demonstrando assim a importância de se utilizar materiais agregados que proporcionem uma melhoria na capacidade de retenção e armazenamento de água nos substratos utilizados em telhados verdes e, conseqüentemente, diminuam o volume de chuva convertido em escoamento.

Estudos já desenvolvidos em Santa Maria - RS, demonstraram a capacidade dos telhados verdes extensivos na diminuição do escoamento pluvial, observou-se durante o período de estudo que, em média, apenas 38% do volume total de chuva resultou em algum tipo de escoamento, ou seja, 62% desse volume foi interceptado pelo telhado verde e devolvido para a atmosfera através do processo de evapotranspiração (TASSI et al., 2014).

Para fins estatísticos utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis para comparação do volume de escoamento gerado em cada composição de substrato (Apêndice H). As medianas seguidas de mesma letra maiúscula na linha (substratos) e minúscula na coluna (eventos) não diferiram estatisticamente entre si.

Em síntese, pode-se dizer que a utilização de telhados verdes nos centros urbanos contribui significativamente para a redução do escoamento pluvial e conseqüentemente a diminuição dos problemas decorrentes da impermeabilização. No entanto, quando o volume de chuva excede a capacidade de retenção do telhado verde, a água excedente é convertida em escoamento, podendo este, conter consideráveis teores de nutrientes. Esses nutrientes são carregados a partir da camada de substrato e podem atingir os mananciais hídricos, tornando-se potenciais causadores do processo de eutrofização.

Portanto, a qualidade da água de escoamento é uma importante variável a ser analisada na seleção de substratos para uso em telhados verdes, pois as características químicas dessas misturas irão influenciar diretamente a qualidade da água de escoamento, podendo melhorar a qualidade da mesma, ou na maioria dos casos, incrementar a concentração de nutrientes.

4.7 QUALIDADE DA ÁGUA DE ESCOAMENTO

A análise qualitativa da água escoada a partir dos diferentes substratos foi analisada quanto aos parâmetros físicos de cor aparente, turbidez e sólidos totais; e químicos de condutividade elétrica, fósforo total e pH. Os valores numéricos para cada parâmetro são

apresentados nos Apêndice I e Apêndice J. Para as avaliações de qualidade da água foram monitorados dez eventos, cujas características são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Especificações dos eventos monitorados na avaliação da qualidade da água escoada

Eventos	Evento 3	Evento 9	Evento s/n*	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
Data (ano 2017)	09/06	08/08	12/08	14/09	16/09	01/10	12/10	19/10	28/10	04/11
Dias Julianos	160	220	224	257	259	274	285	292	301	308
Precipitação (mm)	4,7	17,8	146,7	31,2	17,5	28,5	36,4	49,5	33,7	20,3

s/n: Evento não utilizado na avaliação da capacidade de retenção devido ao extravasamento dos coletores e consequente perda dos dados quantitativos.

Fonte: Elaborado pelo autor

A água pluvial escoada a partir de um telhado verde pode ser utilizada para diferentes fins não potáveis, pois o aproveitamento das águas pluviais (BRASIL, 2017) é um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). No entanto, é de fundamental importância que estas águas apresentem qualidade mínima exigida pela legislação. Qualidade esta, influenciada pelas características dos substratos utilizados nos telhados verdes, os quais podem incrementar a concentração de poluentes na água escoada.

Além desse aspecto, deve-se considerar que, mesmo sem o aproveitamento das águas pluviais, estas irão atingir corpos hídricos e, dependendo dos poluentes carregados, comprometer a qualidade da água do corpo receptor. Dentre os poluentes presentes no escoamento pluvial a partir de telhados verdes, o fósforo e o nitrogênio ganham destaque pelo potencial de eutrofização dos mananciais hídricos, uma vez que, a vegetação, as características do substrato, a profundidade do meio de crescimento e a idade do telhado desempenham um importante papel na regulação e exportação desses nutrientes (BUFFAM; MITCHELL, 2015).

Ainda segundo Buffan e Mitchell (2015), os substratos geralmente contêm elevados teores de nutrientes apesar de se utilizar, em telhados verdes extensivos, plantas que requerem baixas concentrações. Essa incompatibilidade entre as características da vegetação e do substrato, juntamente com outros fatores, favorece a lixiviação dos nutrientes não utilizados pela vegetação.

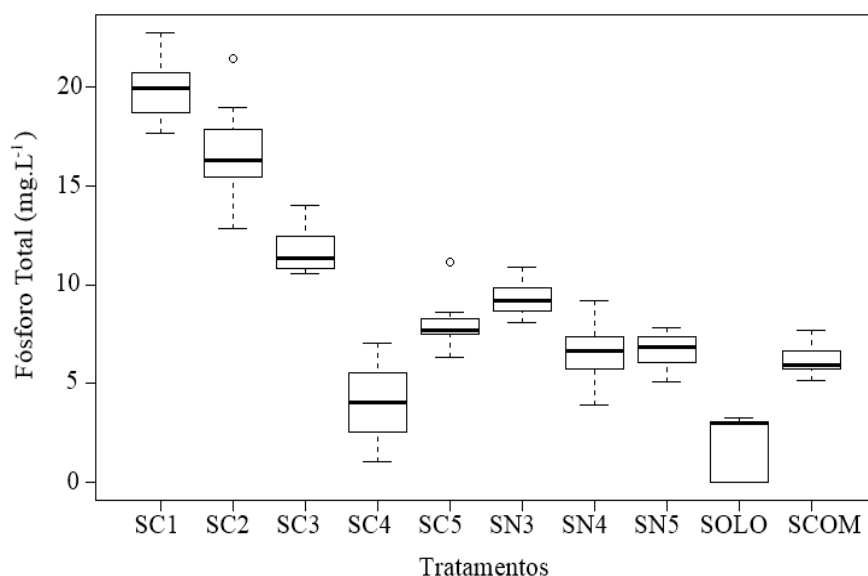
Li e Babcock (2014), destacam que muitos dos estudos publicados atualmente, relatam a presença de fósforo e nitrogênio em quantidades consideráveis nas águas provenientes de telhados verdes. Geralmente são encontrados teores de fósforo superiores aos valores da água de precipitação, enquanto que para nitrogênio, muitas vezes, os teores acabam sendo menores, logo os telhados verdes podem ser um sumidouro, evitando com que o mesmo alcance os

mananciais hídricos. Neste trabalho, não foi possível avaliar os teores de nitrogênio presentes nas águas de escoamento, não sendo possível precisar se os tratamentos atuaram como fonte de nitrogênio ou como sumidouros do mesmo.

As características dos substratos no que se refere à sua composição química, exercem influência direta sobre os níveis de fósforo observados na água de escoamento (BUFFAM; MITCHELL; DURTSCHKE, 2016; PESSOA, 2016). Geralmente, as alterações na qualidade da água de escoamento decorrem da perda por lixiviação dos nutrientes, devido à baixa CTC dos substratos utilizados. Quanto maior for a capacidade de troca de cátions, mais adsorvidos estarão os nutrientes e conseqüentemente não serão lixiviados.

Neste estudo, as concentrações de fósforo total na água de escoamento (Figura 25), demonstraram que as misturas com maiores proporções de casca de arroz carbonizada produziram águas com teores de fósforo consideravelmente superiores às demais composições. Este fato, no entanto, pode não estar necessariamente associado apenas à baixa CTC das misturas, visto que composições com elevada CTC (a exemplo de SC2 - Apêndice A), apresentaram elevados teores de fósforo nas águas de escoamento. Isto porque, as características químicas particulares de cada substrato, e não apenas a CTC, ocasionadas pela mistura de diferentes materiais em distintas proporções podem exercer uma maior influência sobre os teores de nutrientes encontrados na água de escoamento.

Figura 25 - Concentração de fósforo total (mg.L^{-1}) nas águas de escoamento dos substratos



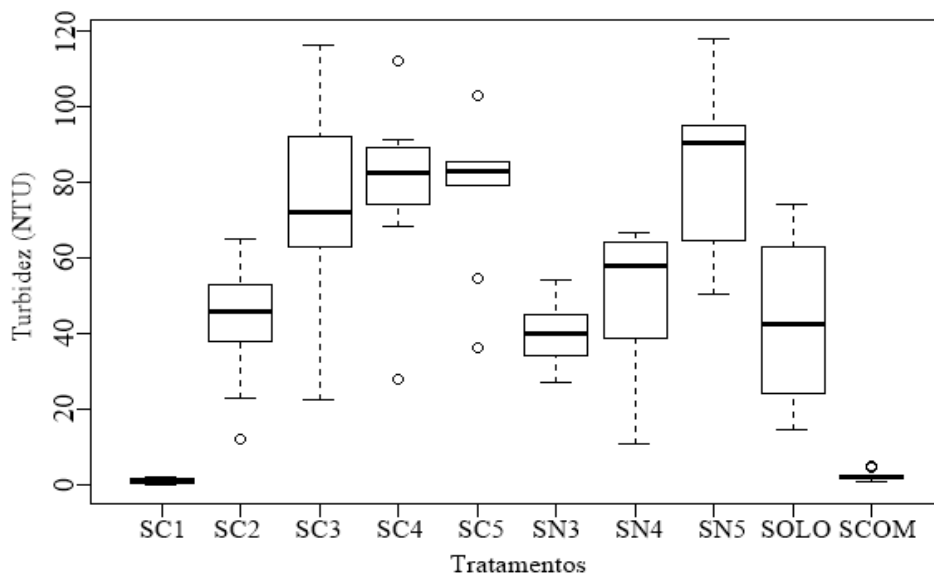
○ - Outliers (medidas discrepantes) no conjunto de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No que tange a turbidez da água, é sabido que a mesma está associada à presença de partículas de argila, silte, areia e outros materiais, decorrentes do carreamento pela água da chuva (FUNASA, 2014; VON SPERLING, 2005), sendo que, geralmente, quanto maior for a concentração de sólidos suspensos totais, maiores serão os valores de turbidez encontrados na água (PESSOA, 2016).

De fato, nas composições onde não houve o uso de solo local (SC1 e SCOM), os valores de turbidez foram muito reduzidos (Figura 26) em comparação com os demais substratos. Outro fator importante, e que explica os elevados valores de turbidez, refere-se à idade do material, substratos novos tendem a liberar partículas finas e a aumentar os valores de turbidez, mas à medida em que as raízes se estabelecem, e o conteúdo orgânico aumenta, a liberação dessas partículas decai e, conseqüentemente, há uma diminuição nos valores de turbidez (LI; BABCOCK, 2014). Corroborando para esta afirmação, o experimento de Pessoa (2016), que verificou concentrações distintas de turbidez em dois telhados verdes com diferentes idades (2 anos e 5 anos), instalados no município de Santa Maria - RS. O autor concluiu que a turbidez do telhado verde mais jovem foi significativamente superior àquela do telhado verde mais velho, e que, além da idade do telhado verde, os fatores citados anteriormente por Li e Babcock (2014), podem ter influenciado os valores de turbidez nas águas de escoamento analisadas.

Figura 26 - Valores de turbidez observados nas amostras de água provenientes dos diferentes tratamentos



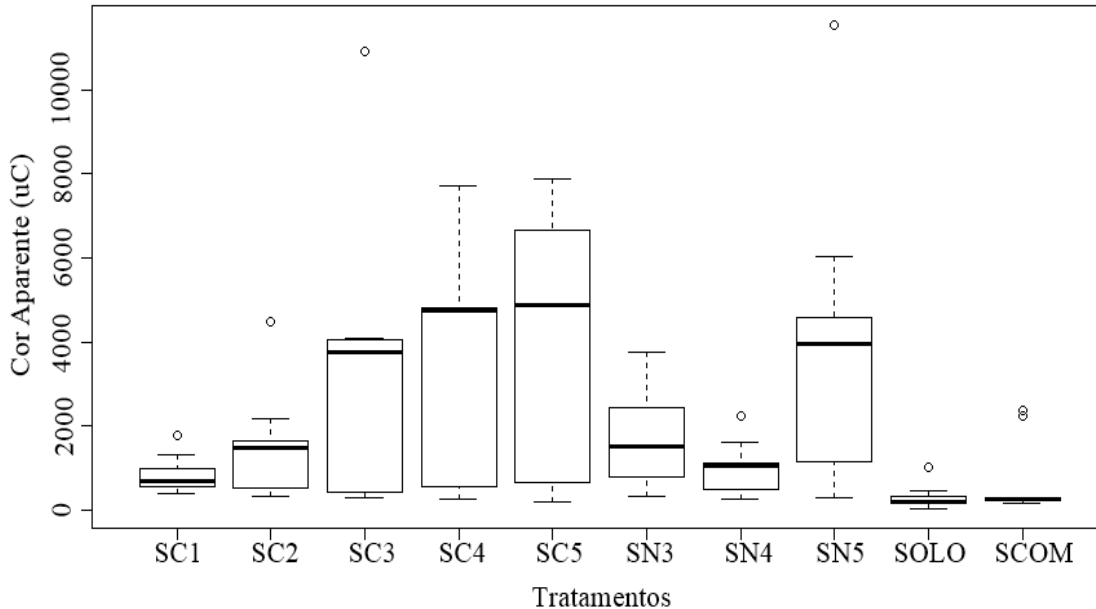
○ - Outliers (medidas discrepantes) no conjunto de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor

Apesar da cor não apresentar risco direto a saúde humana (VON SPERLING, 2005), é um importante parâmetro a ser analisado, pois proporciona uma indicação de qualidade da água devido à presença de matéria orgânica dissolvida, tendo origem natural (ácidos húmicos e fúlvicos) ou antropogênica/mineral (resíduos industriais, compostos de ferro e manganês) (FUNASA, 2014; VON SPERLING, 2005). A cor distingue-se entre cor aparente, onde pode estar inclusa uma parcela devido à turbidez da água e cor verdadeira, quando esta é removida (VON SPERLING, 2005). Neste trabalho, apenas a cor aparente foi determinada (Figura 27).

Para os substratos com maiores proporções de solo, observou-se o aumento na cor aparente nas amostras coletadas. No entanto, a composição composta unicamente por solo local, apresentou valores reduzidos para cor aparente, possivelmente devido à natureza mineral da mistura e aos baixos teores de matéria orgânica presentes na mesma. Os menores valores para cor aparente (SC1 e SCOM) condizem com os substratos com menores valores de turbidez (Figura 26).

Figura 27 - Valores de cor aparente observados nas amostras de água de escoamento a partir dos diferentes substratos



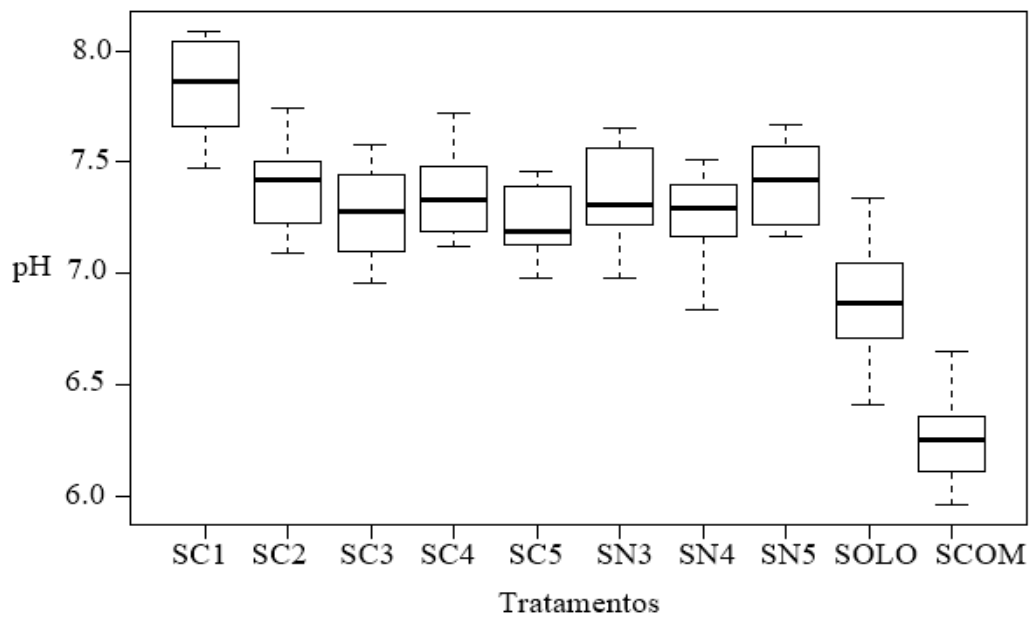
○ - Outliers (medidas discrepantes) no conjunto de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com relação ao pH, a água da chuva coletada diretamente da atmosfera junto ao local de estudo varia entre 4,5 a 6,9 com média de 5,6 (PESSOA, 2016). Na (Figura 28) pode-se observar que todos os tratamentos que receberam casca de arroz (carbonizada ou *in natura*) elevaram os teores de pH, tornando o caráter da água da chuva de ligeiramente ácida para

alcalina, sendo que os menores valores foram observados no substrato comercial a base de turfa, tal resultado era esperado devido à característica alcalina da casca de arroz provocada pela sílica. Em geral, telhados verdes proporcionam a elevação nos teores de pH das águas da chuva, neutralizando o caráter ácido das mesmas nos centros urbanos (BERGHAGE et al., 2007; GILLEN, 2009; PESSOA, 2016).

Figura 28 - Potencial hidrogeniônico das águas escoadas a partir dos diferentes tratamentos estudados



○ - Outliers (medidas discrepantes) no conjunto de dados.

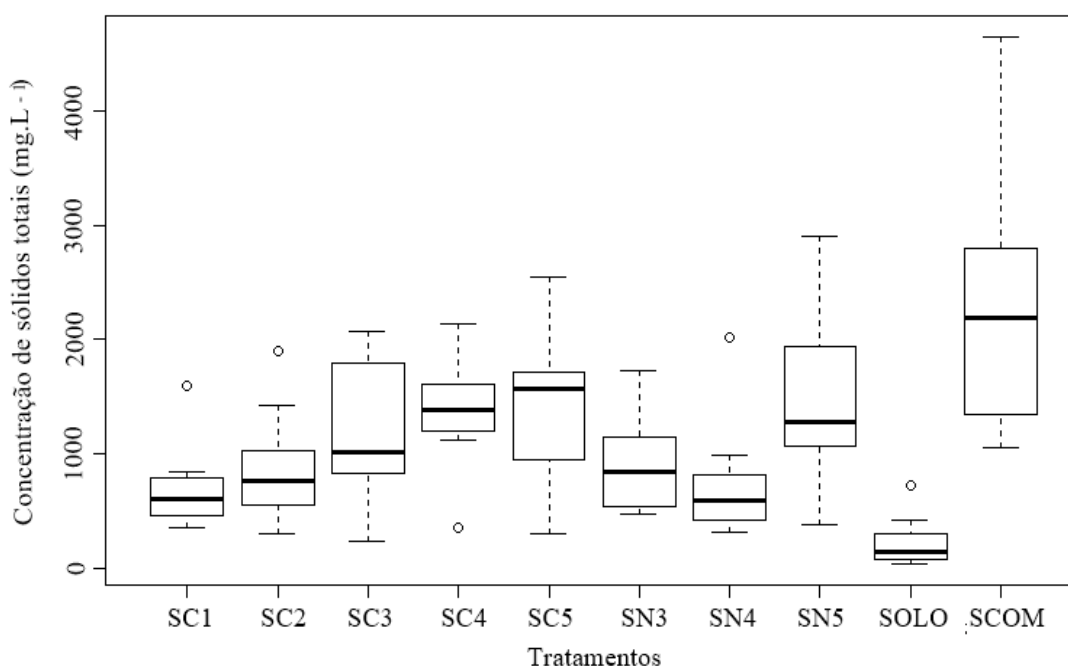
Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 29 apresenta as concentrações de sólidos totais durante o período de monitoramento. As menores concentrações foram observadas nas composições SC1 e SOLO, para SC1, os baixos teores de sólidos totais são explicados devido a composição dessa mistura (50% casca de arroz carbonizada, 0% solo e 50% demais componentes), pois a ausência de solo reduz a quantidade de partículas menores, a exemplo da argila; consequentemente, os valores de turbidez e sólidos totais também descaíram.

Para a composição SOLO, composta apenas por solo do Horizonte A de um Argissolo Vermelho-Amarelo, tem-se valores de sólidos totais muito reduzidos, este fato, contradiz o observado em SC1 – quanto maior a proporção de solo, maiores serão os valores de sólidos presentes na água de escoamento. Possivelmente este fato esteja relacionado à adsorção entre as partículas do solo, evitando assim, que as mesmas sejam carregadas pela água. Provavelmente,

a adição da casca de arroz provocou a desestruturação dessas partículas e, por consequência, elevou os teores de sólidos devido à perda de material.

Figura 29 - Concentrações de sólidos totais presentes nas águas de escoamento de cada tratamento



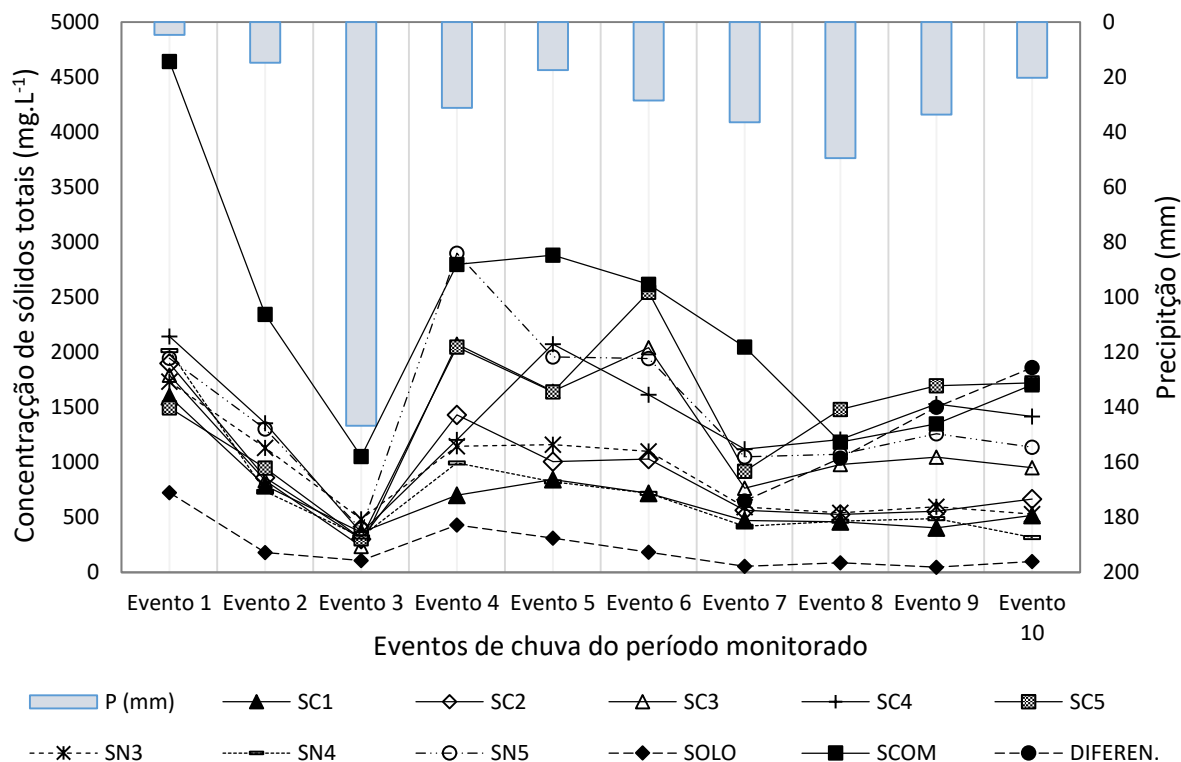
○ - Outliers (medidas discrepantes) no conjunto de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em geral, as concentrações de sólidos totais verificadas na água de escoamento de todos os substratos, mostraram-se muito elevadas em comparação com estudos realizados por Carpenter e Kaluvakolanu (2011), onde a concentração média para um telhado verde extensivo foi de 190 mg.dm^{-3} . Tais valores foram ainda maiores nas composições SCOM, SN5 e SC5. Acredita-se, que as concentrações de sólidos irão diminuir com o passar do tempo, pois as partículas menores presentes na mistura, tendem a sofrer colmatção, dificultando assim, o carreamento das mesmas.

Verificou-se ainda, que as concentrações de sólidos totais diminuíram com o aumento de volume de chuva e aumentaram com a diminuição deste (Figura 30). Precipitações menores geraram águas com maiores concentrações de sólidos totais, enquanto que as precipitações com maior intensidade geraram águas com concentrações inferiores, isto porque o aumento no volume de precipitação proporciona a diluição das partículas no meio (PESSOA, 2016). Este fato é claramente observado no Evento 3, onde a precipitação acumulada ultrapassou 140 mm e, conseqüentemente, as concentrações de sólidos totais foram significativamente menores em comparação com as demais análises.

Figura 30 – Variação da concentração de sólidos totais na água de escoamento dos diferentes tratamentos durante o período de estudo



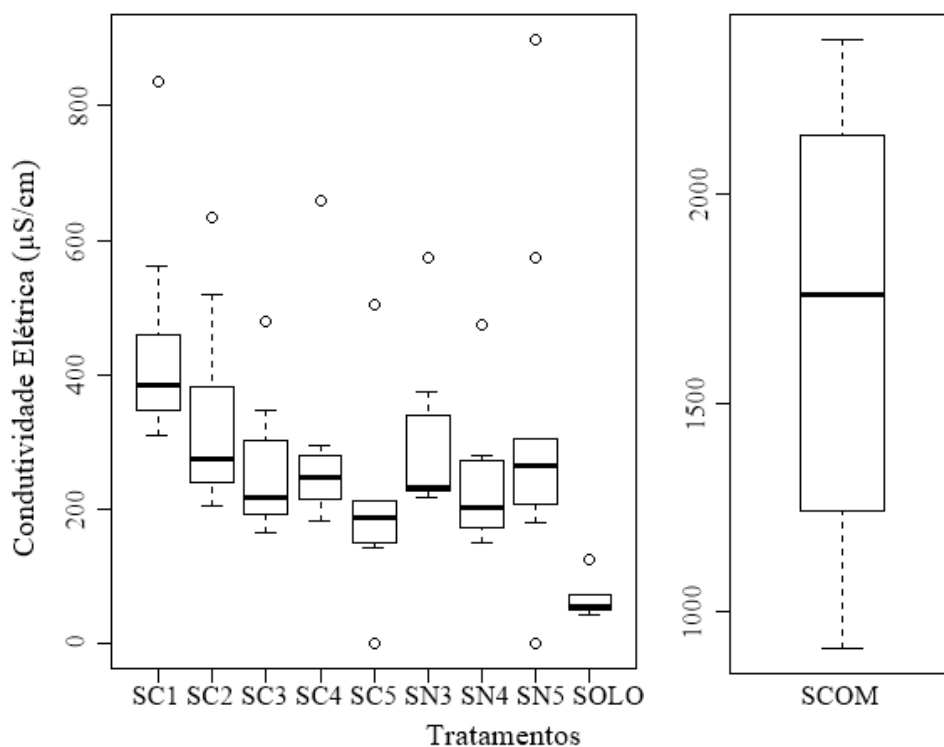
Fonte: Elaborado pelo autor.

A condutividade elétrica (Figura 31) é uma propriedade que indica a capacidade da água em transmitir corrente elétrica em função da presença de substâncias dissolvidas, que se dissociam em ânions e cátions (FUNASA, 2014).

Neste estudo, a condutividade elétrica aumentou gradativamente, conforme a adição da casca de arroz carbonizada às misturas, assim como os teores de fósforo total (Figura 25), demonstrando que, possivelmente, o aumento da condutividade elétrica está relacionado a maior perda de sais dessas misturas. A alta condutividade elétrica encontrada da água proveniente do substrato comercial, é explicada pela composição do mesmo, a base de turfa.

Pessoa (2016), verificou que a condutividade elétrica média da água da chuva coletada diretamente da atmosfera em Santa Maria – Rio Grande do Sul foi de aproximadamente $11,9 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Consequentemente, valores superiores a estes representam um incremento ocasionado pelos substratos à água de escoamento.

Figura 31 – Valores de condutividade elétrica da água escoada a partir dos diferentes tratamentos



○ - Outliers (medidas discrepantes) no conjunto de dados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao se comparar os valores de cor aparente, turbidez, pH, condutividade, fósforo total e sólidos totais (Apêndice K), com o estabelecido pela NBR 15.527/2007 e pelo Manual da Agência Nacional de Águas (2005), observa-se que nenhuma das composições atendeu a todos os parâmetros estudados. No entanto, para os valores de pH das águas de escoamento de todas as composições mantiveram-se dentro da faixa estabelecida (6,0 – 9,0). Apenas as águas provenientes da composição SC1 mantiveram valores de turbidez inferiores ao estabelecido pelas normativas. Os demais parâmetros não foram alcançados.

Os resultados obtidos até o presente momento, no que tange à qualidade da água escoada não são conclusivos, no entanto, fornecem uma indicação de que os telhados verdes podem incrementar ou reduzir a carga poluidora das águas pluviais, dependendo das características do meio de crescimento e do tempo de instalação do mesmo (BUFFAM; MITCHELL; DURTSCHÉ, 2016). Recomenda-se, portanto, o monitoramento por um período de tempo superior, a fim de se verificar as modificações decorrentes do processo de decomposição da matéria orgânica.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados, verificou-se que a obtenção de um substrato que atenda às múltiplas características desejáveis para uso em telhados verdes pode ser de difícil obtenção, deste modo, deve-se priorizar composições que possuam características consideradas mais importantes para o bom desempenho do sistema e para o propósito para o qual o telhado verde foi concebido (amortização dos eventos chuvosos, paisagismo, horticultura, etc.).

Desta forma, considerando-se as diversas variáveis analisadas, e que, o propósito principal dos telhados verdes extensivos está relacionado ao controle quantitativo do escoamento pluvial, concluiu-se que, das composições formuladas a partir do uso de casca de arroz, o substrato denominado SC4 (30% solo, 20% casca de arroz carbonizada, 15% vermicomposto, 15% vermiculita e 20% resíduo da construção civil) apresentou um desempenho equivalente ao substrato comercial a base de turfa (SCOM) e superior à composição utilizada como controle, composta apenas por solo local (SOLO).

Os resultados obtidos durante o período de monitoramento, permitiram inferir que:

- O uso de passivos ambientais pode ser uma alternativa ambientalmente adequada para a destinação dos inúmeros resíduos provenientes das atividades humanas;
- Os resíduos da construção civil e da rizicultura apresentam potencial de uso na composição de substratos para telhados verdes, melhorando as características físicas e assim permitindo uma maior eficiência no controle do escoamento pluvial;
- As proporções de cada componente utilizada na composição dos substratos devem ser administradas com atenção, pois o excesso de uma ou a falta de outra podem comprometer as características do substrato e, por consequência, o desempenho dos telhados verdes;
- O resíduo da construção civil, mostrou-se como um material altamente eficiente no armazenamento de água, sendo uma alternativa apropriada para uso como material agregado na composição de substratos para uso em telhados verdes, desde que respeitados os limites de carga, ocasionado pelo aumento na proporção desse material à mistura;
- As propriedades físico-químicas da casca de arroz *in natura* conferem alta resistência à umidade, enquanto que a casca de arroz carbonizada permite uma maior retenção de água e, consequentemente, um melhor desempenho quando utilizada na composição de substratos;
- A utilização da casca de arroz *in natura* mostrou-se inadequada, devido à baixa capacidade de retenção de água, bem como, ao reduzido desenvolvimento da vegetação em comparação com os tratamentos análogos onde utilizou-se casca de arroz carbonizada;

- A cobertura vegetal apresentou melhor desempenho quando cultivada nos substratos com casca de arroz carbonizada, enquanto que nas composições com casca de arroz *in natura* o desenvolvimento manteve-se nulo ou decaiu, principalmente no período de estiagem;

- A curva de retenção de água, e a capacidade de amortização do escoamento pluvial, verificados neste trabalho evidenciaram a superioridade do substrato comercial à base de turfa, em comparação com as demais composições, bem como, o aumento na capacidade de retenção de água nas misturas que receberam maior proporção de casca de arroz carbonizada;

- O aumento na capacidade de retenção não necessariamente estará relacionado a maior capacidade de armazenamento, visto que, proporções maiores de casca de arroz carbonizada podem aumentar o volume de macroporos e conseqüentemente a capacidade de drenagem dos substratos;

- A eficiência de cada substrato no que tange ao controle quantitativo do escoamento pluvial foi verificada a partir da taxa de retenção, da capacidade de armazenamento e pelo coeficiente de escoamento, evidenciando que as composições SC4 e SCOM apresentaram o melhor desempenho no controle quantitativo do escoamento pluvial em comparação com os demais substratos estudados;

- Quanto à qualidade da água de escoamento, observou-se a alteração dos parâmetros físico-químicos analisados, demonstrando um incremento na carga poluidora ocasionado pela passagem da água pela camada de substrato em todas as composições;

- O período seco antecedente ao evento de chuva influenciou fortemente a taxa de retenção de cada composição, ou seja, verificou-se que quanto maior o período seco, maior foi a capacidade de retenção água das misturas;

- As composições que utilizaram casca de arroz carbonizada apresentaram um desempenho superior em todos os parâmetros estudados, quando em comparação com os substratos formulados a partir de casca de arroz *in natura*;

Conclui-se, portanto, que todas as composições estudadas apresentaram particularidades em um ou mais parâmetros analisados, reafirmando que a seleção de um substrato para uso em telhados verdes deve ponderar, não todas, mas sim as características consideradas fundamentais para um bom desempenho do sistema, permitindo assim a manutenção da vegetação, a retenção de um volume considerável de água e a conservação de um ecossistema duradouro e autossustentável.

6 LIMITAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Esta pesquisa apresentou limitações em diversos pontos, com destaque às análises de qualidade da água, as quais foram insuficientes para precisar a real contribuição dos substratos ao aporte de nutrientes às águas de escoamento, principalmente quanto aos teores de nitrogênio presente nas amostras.

A utilização da casca de arroz carbonizada pode representar um empecilho para a sustentabilidade do processo de produção de substratos a partir desse material, pois o processo de carbonização, quando realizado de forma inadequada, pode emitir quantidades consideráveis de CO₂ na atmosfera.

Outro fator importante, não avaliado nesta pesquisa, refere-se à resistência das misturas ao fogo, principalmente em regiões de clima quente onde podem ocorrer incêndios naturais decorrentes das altas temperaturas e da baixa umidade relativa do ar, bem como, a resistência dos substratos aos processos de erosão eólica ou hídrica.

Para uma maior confiabilidade nos resultados obtidos, recomenda-se a continuidade do monitoramento em campo, preferencialmente superior a um ano, para que se possa avaliar, entre outros fatores, a interferência da variabilidade climática no desempenho dos substratos.

Sugere-se ainda, novas investigações, onde os teores de resíduo da construção civil possam ser alterados, com o propósito de se buscar novas composições com bom desempenho quanto a capacidade de retenção e armazenamento de água, e que atendam ao limite máximo de sobrecarga estrutural.

Por fim, espera-se que este trabalho sirva de base para a continuação de pesquisas voltadas ao uso de materiais alternativos na composição de substratos para uso em telhados verdes, de forma a incentivar a utilização dos mesmos em regiões onde ainda não se tem conhecimento a respeito dos benefícios desta tecnologia para o desenvolvimento sustentável e a melhoria da qualidade de vida nos centros urbanos.

7 REFERÊNCIAS

- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.
- ALLNUTT, P.; BUSSEY, W.; GEDGE, D.; HARRIS, M. HENNING, I.; POË, S.; RIDOUT, N.; Singleton, P.; SORRILL, J.; TARR, A.; ZELLER, S. **The GRO Green Roof Code: Green Roof Code of Best Practice for the UK 2011**.
- ALOISIO, J.M.; TUININGAA, A.R.; LEWIS, J.D. **Crop species selection effects on stormwater runoff and edible biomass in an agricultural green roof microcosm**. Ecological Engineering, 88, 20–27, 2016.
- FEPAM - FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL – RS, **Diretriz Técnica nº 002/2011 – DIRTEC**. Gestão de resíduos caracterizados como casca de arroz e cinzas resultantes do processo de queima da casca. Disponível em: <http://www.fepam.rs.gov.br/central/diretrizes/Diret_Tec_02_2011.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2018.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington: APHA, 2012.
- AMPIM, P. A. Y.; SLOAN, J. J.; CABRERA, R. I.; HARP, D. A. H. JABERS, F. H. **Green Roof Growing Substrates: Types, Ingredients, Composition and Properties**. Journal of Environmental Horticulture, vol. 28, no. 4, pp. 244-252, 2010.
- ANA, FIESP & SINCUSCON-SP. **Conservação e reuso de água em edificações: aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis: requisitos**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.527: **Água de chuva: aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis: requisitos**. Rio de Janeiro, 2007. 8 p.
- AZEVEDO, G. de; TORTELLI, G. M.; VIEIRA, M. L. **Diferentes níveis de retenção de água em substratos comerciais para uso agrícola**. X Reunião Sul-Brasileira de Ciência do Solo Fatos e Mitos em Ciência do Solo, Pelotas, RS. 2014.
- BATES, A. J.; SADLER, J. P.; GRESWELL, R. B.; MACKAY, R. **Effects of recycled aggregate growth substrate on green roof vegetation development: A six year experiment**. Landscape and Urban Planning 135, 22–31, 2015.
- BAUER, L. **Estimação do coeficiente de correlação de Spearman ponderado**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação de mestrado, Porto Alegre: UFRGS, 2007.
- BEATRICE, C. C. **Avaliação do potencial de uso de três espécies vegetais como cobertura leve de telhados em edificações**. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

BEECHAM, S.; RAZZAGHMANESH, M. **Water quality and quantity investigation of green roofs in a dry climate.** *Water research*, 70, 370 - 384, 2015.

BENGTSSON, L.; GRAHN, L.; OLSSON, J. **Hydrological function of a thin extensive green roof in southern Sweden.** *Nordic Hydrology*, Vol 36 N. 3 pp 259–268, 2004.

BERGHAG, R.; JARRETT, A.; BEATTIE, D.; KELLEY, K.; HUSAIN, S.; REZAI, F.; LONG, B.; NEGASSI, A.; CAMERON, R.; HUNT, W. **Quantifying Evaporation and Transpirational Water Losses from Green Roofs and Green Roof Media Capacity for Neutralizing Acid Rain.** National Decentralized Water Resources Capacity Development Project. Pennsylvania State University and North Carolina State University, 2007.

BERNDTSSON, J. C. **Green roof performance towards management of runoff water quantity and quality: A review.** *Ecological Engineering*, Vol. 36, p. 351-360, 2010.
Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857410000029>>.
Acesso em: 20 jul. 2016.

BERRETTA, C.; POË, S.; STOVIN, V. **Moisture content behaviour in extensive green roofs during dry periods: The influence of vegetation and substrate characteristics.** *Journal of Hydrology* 511, 374–386, 2014.

BRASIL, Lei nº 9.433, de 8 janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos.** Brasília, DF, jan. 1997.

BRASIL. Lei nº 13.501, de 30 de outubro de 2017. **Altera o art. 2º da Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997.** Brasília, DF, out. 2017.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAS.** Ministério da Saúde, Fundação Nacional de Saúde. – Brasília: Funasa, 112 p. 2014.

BRENNEISEN, S. **Space for Urban Wildlife: Designing Green Roofs as Habitats in Switzerland.** *Urban Habitat*. Volume 4, Number 1, 2006. Disponível em:
<http://www.urbanhabitats.org/v04n01/wildlife_pdf.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2016.

BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E. Chapter 5: Nutrient Cycling in Green Roof Ecosystems. In: SUTTON, R. K (Ed.). **Green Roof Ecosystems**, *Ecological Studies* 223, Springer International Publishing Switzerland, 2015. p. 107-137.

BUFFAM, I.; MITCHELL, M. E.; DURTSCHKE, R. D. **Environmental drivers of seasonal variation in green roof runoff water quality.** *Ecological Engineering* 91, 506–514, 2016.

BURÉS, S. **Manejo de substratos.** In: I Curso de gestión de viveros forestales. Conserjería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Andalucía, 2001.

BUTLER, C., BUTLER, E., ORIAN, C.M. **Native plant enthusiasm reaches new heights: perceptions, evidence and the future of green roofs.** *Urban For. Urban Green*. 11,1–10, 2012.

CAO, C. T.N.; FARRELL, C.; KRISTIANSENC, P. E. RAYNERA, J. P. **Biochar makes green roof substrates lighter and improves water supply to plants.** *Ecological Engineering* 71 (2014) 368–374.

CARMO, D. L. do. **Quantificação e fator de conversão de carbono em matéria orgânica para resíduos orgânicos**. Lavras: UFLA, 2011.

CARRIJO, O. A.; LIZ, R.S.; MAKISHIMA, N. **Fibra da casca do coco verde como substrato agrícola**. Horticultura Brasileira, Botucatu, v. 20, n. 4, p. 533-535, 2002.

CARSON, T.B.; ASCE, A.M.; HAKIMDAVAR, R.; SJOBLUM, K.J.; CULLIGAN, P.J.; ASCE, M. **Viability of recycled and waste materials as Green Roof substrates**. Columbia University, New York, NY. GeoCongress 2012, ASCE 2012.

CASAROLI, D.; VAN LIER, K. de J. **Critérios para determinação da capacidade de vaso**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32:59-66, 2008.

CASTLETON, H.F.; STOVIN, V.; BECK, S.B.M.; DAVISON, J.B. **Green roofs: building energy savings and the potential for retrofit**. Energy and Buildings 42, 1582–1591, 2010.

CHAND R.; WATARI, T.; INOUE, K.; KAWAKITA, H.; LUITEL, H.N.; PARAJULI, D.; TORIKAI, T.; MI YADA. **Selective adsorption of precious metals from hydrochloric acid solutions using porous carbon prepared from barley straw and rice husk**. Minerals Engineering 22:1277-1282, 2009.

CHEN, C. F.; KANG, S. F. **Effects of substrates and plant species on water quality of extensive green roofs**. Applied Ecology and Environmental Research 14 (2): 77-91. Budapest, Hungary, 2016.

COFFMAN, R. R. **Vegetated roof systems: Design, productivity, retention, habitat, and sustainability in green roof and ecoroof technology**. Ohio State University. Dissertation Degree Doctor of Philosophy, 2007.

COLLA, S.R.; WILLIS, E.; PACKER, L. **Can green roofs provide habitat for urban bees (Hymenoptera: Apidae)?**. Cities and the Environment. 2(1): article 4, 12 pp. 2009.

Disponível em:

<<http://digitalcommons.lmu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1017&context=cate>>. Acesso em: 26 jul. 2016.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do arroz**. Aroldo Antonio de Oliveira Neto (Org). Brasília: Conab, 180 p. 2015.

DE BOODT M; VERDONCK O; CAPPAERT I. **Method for measuring the water release curve of organic substrates**. Acta Horticulturae 37:2054-2062, 1974.

DE BOODT, M.; VERDONCK, O. **The physical properties of the substrates in horticulture**. Acta Horticulturae, Wageningen, v.26, p.37-44, 1972.

DELLA, V.P.; KÜHN, I.; HOTZA, D. **Reciclagem de Resíduos Agro-Industriais: Cinza de Casca de Arroz como Fonte Alternativa de Sílica**. Cerâmica Industrial, v.10, n.2, p. 22-25, 2005.

DONAGEMA, G. K. (Org.). **Manual de métodos de análise de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 230 p. 2011.

DOSHI, H.; AMPAS, L.; COOK, G.; DANIELS, S.; HALE, K.; HONG, J.; KUHN, M.; MITTA, D.; PECK, S.; SCOTT, L.; WEBBER, D.; ALCAZAR, S.S. **Toronto Green Roof Construction Standard: Supplementary Guidelines**. Technical Advisor Office of the Chief Building Official Toronto Building, 2006.

DUNNETT, N. **Green Roofs for Biodiversity: Reconciling Aesthetics with Ecology**. Fourth Annual Greening Rooftops for Sustainable Communities. Conference, Awards and Trade Show, 2006.

DUNNETT, N., NAGASE, A., HALLAM, A. **The dynamics of planted and colonising species on a green roof over six growing seasons 2001–2006: influence of substrate depth**. *Urban Ecosyst.* 11, 373–384, 2008.

DUNNETT, N.; NAGASE, A.; BOOTH, R.; GRIME, P. **Influence of vegetation composition on runoff in two simulated green roof experiments**. *Urban Ecosyst* 11: 385–398, 2008.

DVORAKA, B.; VOLDER, A. **Green roof vegetation for North American ecoregions: A literature review**. *Landscape and Urban Planning* 96, pp. 197–213, 2010.

EKSI, M.; ROWE, D. B. **Green roof substrates: Effect of recycled crushed porcelain and foamed glass on plant growth and water retention**. *Urban Forestry & Urban Greening*, V. 20, pág. 81–88, 2016.

EMBRAPA, Agrobiologia. **Minhocultura ou Vermicompostagem: Criação de minhocas para produzir fertilizante orgânico capaz de melhorar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo**. Bairro Ecologia: Seropédica, RJ, 2011.

FERMINO, M. H. O uso da análise física na avaliação da qualidade de componentes e substratos. In: FURLANI, A. M. C.; BATAGLIA, O. C.; ABREU, M. F.; ABREU, C. A.; FURLANI, P.R.; QUAGGIO, J. A.; MINAMI, K. **Caracterização, manejo e qualidade de substratos para produção de plantas**. Campinas: Instituto Agrônomo, n. 70, p. 29-37, 2002.

FLL, 2008. **Guidelines for the Planning, Construction and Maintenance of Green Roofing**, English ed. Forschungsgesellschaft landschaftsentwicklung landschaftsbau, Bonn (March 2008, German edition).

FRANCIS, J.; HALL, G.; MURPHY, S. RAYNOR, J. **Growing Green Guide: A Guide to Green Roofs, Walls and Facades in Melbourne and Victoria Australia**. State of Victoria through the Department of Environment and Primary Industries, 2014. Disponível em: http://www.growinggreenguide.org/wp-content/uploads/2014/02/growing_green_guide_ebook_130214.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2016.

FRIEDRICH, C. **Selecting the Proper Components for a Green Roof Growing Media**. *Low Impact Development*: 2008, pp. 240-251.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; **Selecting Plants for Extensive Green Roofs in the United States**. Michigan State University, Extension Bulletin E-3047 - July 2008.

GETTER, K. L.; ROWE, D.B. **The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Development**. HortScience 41(5):1276–1285. 2006. Disponível em: <<https://msu.edu/course/atm/431/LowImpact/Getter%20HS%20Review%20Aug%2006.pdf>>. Acesso em: 13 jun. 2016.

GETTER, K.; ROWE, D.; ANDRESEN, J. **Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention**. Ecological Engineering, 31: 225-231, 2007.

GILLEN, J. **The Effect of Vegetated Roofs on Acid Precipitation Runoff**. University at Albany, State University of New York. Dissertação de mestrado, 2009.

GRACESON, A.; HARE, M.; HALL, N.; MONAGHAN, J. **Green roofs: How do plants grow on different materials?**. Harper Adams University College: Project Report. Disponível em: <<http://www.vitalearth.tv/pdf/harper-adams-greenroofs.pdf>>. Acesso em: 14 ago. 2016.

GUERRINI, I. A.; TRIGUEIRO, R. M. **Atributos físicos e químicos de substratos compostos por biossólidos e casca de arroz carbonizada**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 28:1069-1076, 2004.

HOFMANN, G. Verbindliche methoden zur untersuchung von TKS und gartnerischen erden. **Mitteilungen der VSLUFA**, Heft, v.6, p.129-153, 1970.

HUI, S. C. M. **Technical Guidelines for Green Roofs Systems in Hong Kong**. Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, 2011. Disponível em: <http://www.mech.hku.hk/bse/greenroof/HK_Green_Roof_Technical_Guidelines.pdf>. Acesso em 27 jul. 2016.

HUI, S. C. M.. **Benefits and potential applications of green roof systems in Hong Kong**. In: Proceedings of the 2nd Megacities International Conference 2006, 1-2 December 2006, Guangzhou, China, pp. 351-360. Disponível em: <http://web.hku.hk/~cmhui/Megacities2006_SamHui.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2016

HUTCHINSON, D.; ABRAMS, P.; RETZLAFF, R.; LIPTAN, T. **Stormwater monitoring of two ecoroofs in Portland, Oregon, USA**. Greening Rooftops for Sustainable Communities. Chicago, Illinois, USA, 2003.

IPP – Potash & Phosphate Institute, EUA, 1995. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**. Tradução e adaptação de Alfredo Scheid Lopes. 2 ed. rev. e ampl. Piracicaba: Potafos, 1998. Disponível em: <[http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/40A703B979D0330383257FA80066C007/\\$FILE/Manual%20Internacional%20de%20Fertilidade%20do%20Solo.pdf](http://brasil.ipni.net/ipniweb/region/brasil.nsf/0/40A703B979D0330383257FA80066C007/$FILE/Manual%20Internacional%20de%20Fertilidade%20do%20Solo.pdf)>. Acesso em: 24 nov. 2016.

IRGA, INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ. **Série Histórica de Produção e Produtividade - RS x BR**, 2016. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20160720141326producao_rs_e_brasil.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2016.

JOBIM, L. A. **Diferentes tipos de telhados verdes no controle quantitativo da água pluvial**. 75f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2013.

- KADAS, G. **Rare invertebrates colonizing green roofs in London**. Urban Habitats 4: 66-86, 2006.
- KADAS, G. **Rare Invertebrates Colonizing Green Roofs in London**. Urban Habitat. Volume 4, Number 1, 2006. Disponível em: <http://urbanhabitats.org/v04n01/invertebrates_pdf.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2016.
- KÄMPF, A.N. **Materiais regionais como alternativa ao substrato**. In: Encontro Nacional sobre Substratos para Plantas - Materiais Regionais como substrato, 6, 2008, Fortaleza. Anais eletrônicos. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, SEBRAE /CE e UFC, 2008.
- KÄMPF, A.N. **Produção comercial de plantas ornamentais**. Guaíba: Agrolivros, 256 p., 2005.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 212 p. 2008.
- KNOPIK, F. **Telhados Verdes**. Paisagismo e jardinagem. 2014. Disponível em: <<http://www.arquidicas.com.br/telhados-verdes/>>. Acesso em: 28 nov. 2016.
- KOLB, W. **Good Reasons for Roof Planting - Green Roofs and Rainwater**. Proc. IC on Urban Horticulture, Eds: R. Junge-Berberovic et al. Acta Hort 643, ISHS, 2004. Disponível em: <http://195.130.72.98/images/stories/acta/Acta%20643/643_38.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2016.
- KOLB, W.; SCHWARZ, T. 1999. Dachbegrünung: Intensiv und extensive. Eugen Ulmer, Stuttgart. In: LENNEP, E. V.; FINN, S. **Green Roofs Over Dublin: A Green Policy Guidance Paper for Dublin**. Tepui, Dublin, 2008.
- LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTTI, F.; BUSATO, F. **Experimental measurements and numerical modelling of a green roof**. Energy and Buildings 37, 1260–1267, 2005.
- LENNEP, E. V.; FINN, S. **Green Roofs Over Dublin: A Green Policy Guidance Paper for Dublin**. Tepui, Dublin, 2008.
- LI, Y.; BABCOCK, R. **Green roofs against pollution and climate change**. A review. Agronomy for Sustainable Development, p. 695-705, 2014. 10.1007/s13593-014-0230-9.
- LI, Y.; DING, X.; GUO, Y.; RONG, C.; WANG, L.; QU, Y.; MA, X.; WANG, Z. **A new method of comprehensive utilization of rice husk**. Journal of Hazardous Materials 186/2151–2156, 2011.
- LIESECKE, H. J. **Characteristic Values of Plant Substrates for Extensive Green Roofs**. Leibniz Universität Hannover. Institut für Landschaftsarchitektur Technisch-konstruktive Grundlagen der Freiraumplanung, 2006.
- LIU, R.; COFFMAN, R. **Lightweight Aggregate Made from Dredged Material in Green Roof Construction for Stormwater Management**. Ed. Jorge de Brito. Materials 9.8 (2016): 611. PMC, 2016.
- LIVINGSTONE, K.; ROGERS, R.; BISHOP, P. **Living Roofs and Walls Technical Report: Supporting London Plan Policy**. Mayor of London, Greater London Authority, London, 2008.

LÖBLER, C. A.; SCCOTI, A. A. V.; WERLANG, M. K. **Contribuição à delimitação dos biomas Pampa e Mata Atlântica no município de Santa Maria, RS**. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental, Santa Maria, v. 19, n. 2, mai -ago. p. 1250-1257, 2015. Disponível em: <<http://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/16038/pdf>>. Acesso em: 02 ago. 2016.

LORENZINI NETO, F. **Modelagem de telhado verde: uma análise da eficiência no controle do escoamento pluvial em diferentes escalas**. 2014, 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

LUNDHOLM, J., MACLVOR, J. S., MACDOUGALL, Z., & RANALLI, M. **Plant species and functional group combinations affect green roof ecosystem functions**. PLoS ONE, 5(3), e9677. doi:10.1371/journal.pone.0009677, 2010.

MACCAFERRI, DO BRASIL LTDA. **MacDrain geocomposto drenante**. 2014. Disponível em: <http://www.macdrain.com.br/?page_id=375#comics>. Acesso em: 01 dez. 2016.

MAGILL, J. D.; MIDDEN, K.; GRONINGER, J.; THERRELL, M. **A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research**. Research Papers, Paper 91, Southern Illinois University Carbondale, 2011.

MARTÍNEZ, P.F.; ROCA, D. **Sustratos para el cultivo sin suelo: Materiales, propiedades y manejo**. En: Flórez R., V.J. (Ed.). Sustratos, manejo del clima, automatización y control en sistemas de cultivo sin suelo. Bogotá: Editorial Universidad Nacional de Colombia. pp. 37-77, 2011.

MAYER, F. D.; HOFFMANN, R.; RUPPENTHAL, J. E. **Gestão Energética, Econômica e Ambiental do Resíduo Casca de Arroz em Pequenas e Médias Agroindústrias de Arroz**. In: Simposio de Engenharia de Produção da UNESP, 13. Bauru, SP. Anais eletrônicos. Bauru: UNESP, 2006. Disponível em: <http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/124.pdf>. Acesso em: 06 set. 2016.

MDU, Manual de drenagem urbana. **Programa de saneamento ambiental da região metropolitana de Curitiba**. Plano diretor de drenagem para a bacia do rio Iguaçu na região metropolitana de Curitiba. Governo do estado do Paraná, Secretaria de estado do meio ambiente e recursos hídricos, 2002.

MEDEIROS, C. A. B. **Carbonização da casca de arroz para utilização em substratos destinados à produção de mudas**. Embrapa Clima Temperado, p. 24, 1998. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/86191/1/Digitalizar0002.pdf>>. Acesso em: 07 nov. 2017.

MENTENS, J.; RAES D.; HERMY, M. **Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized, 21st century**. Landscape and Urban Planning 77 , 217-226, 2006.

MICKOVSKI, S. B.; BUSS, K.; MCKENZIE, B. M.; SÖKMENER, B. **Laboratory study on the potential use of recycled inert construction waste material in the substrate mix for extensive green roofs**. Ecological Engineering 61P. 706– 714, 2013.

- MIETH, P. **Caroço de pêssego triturado: Alternativa de substrato para produção de mudas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, 100 p. 2016.
- MILLA, O. V.; RIVERA1, E. B.; HUANG, W.J.; CHIEN, C.C. WANG, Y. M. **Agronomic properties and characterization of rice husk and wood biochars and their effect on the growth of water spinach in a field test.** Journal of Soil Science and Plant Nutrition, 13 (2), 251-266, 2013.
- MIRO, D. C.; SIMS, V. **Case Study: Green Roof Substrate using Aerated concrete waste.** Integrated waste management for the production of construction material. 2007. Disponível em: <http://www.smartwaste.co.uk/filelibrary/GreenRoof_Aeratedconcrete.pdf>. Acesso em: 05 set. 2016.
- MOLINEUX, C. J.; FENTIMAN, C. H.; GANGE, A. C. **Characterising alternative recycled waste materials for use as green roof growing media in the U.K.** Ecological Engineering 35, 1507–1513, 2009.
- MONTERUSSO, M.; ROWE, D.; RUGH, C.; RUSSEL, D. **Runoff water quantity and quality from green roof systems.** Acta Hort, 639: 369-376, 2004.
- MURPHY, J. & RILEY, J.P. **A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters.** Analytica Chimica Acta, 27:31-36, 1962.
- NAGASE, A.; DUNNETT, N. **Amount of water runoff from different vegetation types on extensive green roofs: Effects of plant species, diversity and plant structure.** Landscape and Urban Planning 104, 356– 363, 2012.
- NAGASE, A.; DUNNETT, N. **The relationship between percentage of organic matter in substrate and plant growth in extensive green roofs.** Landscape and Urban Planning 103, 230– 236, 2011.
- NEKTARIOS, P.A.; KASTRITSIS, S.; NTOULAS, N.; TSIOTSIPOULOU, P. **Substrate amendment effects on potted plant production and dry weight partition of *Lantana camara*.** Hort-Science 46:864–869, 2011.
- NOYA, M. G.; CUQUEL, F. L.; SCHAFFER, G.; ARMINDO, R. A. **Substrates for cultivating herbaceous perennial plants in extensive green roofs.** Ecological Engineering 102 (2017) 662–669, 2017.
- OBERNDORFER, R.; LUNDHOLM, J.; BASS, B.; COFFMAN, R. R.; DOSHI, H.; DUNNETT, N.; GAFFIN, S.; KÖHLER, M.; LIU, K. K. Y.; ROWE, B. **Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services.** BioScience, Vol. 57 No. 10, 2007.
- ONU – Organização das Nações Unidas. **Propostas para a Rio+20,** Rio de Janeiro – Brasil, 2012. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/cidades.pdf>>. Acesso em: 01 ago. 2016.
- PAPAFOTIOU, M.; PERGIALIOTI, N.; TASSOULA, L. **Growth of Native Aromatic Xerophytes in an Extensive Mediterranean Green Roof as Affected by Substrate Type and Depth and Irrigation Frequency.** HortScience 48(10):1327–1333, 2013.

- PECK, S.; CALLAGHAN, C.; KUHN, M.; BASS, B. **Greenbacks from Green Roofs: Forging a New Industry in Canada**. Canada Mortgage and Housing Corporation, 11-12. 1999. Disponível em: <<http://www.w.carmelacanzonieri.com/3740/readings/greenroofs%2Bgreen%20design/Greenbacks%20from%20greenroofs.pdf>>. Acesso em: 26 jul. 2016.
- PEREIRA, J. R. D.; CARVALHO, J. de A.; MIGUEL, D. S.; SANTANA, M. J. de. **Consumo de água pela cultura do crisântemo cultivada em ambiente protegido**. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.25, n.3, p.651-659, set./dez. 2005. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/eagri/v25n3/28060.pdf>>. Acesso em: 19 set. 2016.
- PERELLI, G. A. **Characterization of the Green Roof Growth Media**. University of Western Ontario, Master Thesis in Engineering Science. Electronic Thesis and Dissertation Repository. Paper 2205.
- PESSOA, J. O. **Qualidade e Quantidade de águas pluviais escoadas a partir de telhados verdes extensivos em Santa Maria – RS**. 2016, 161 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.
- POË, S.; STOVIN, V.; BERETTA, C. **Parameters influencing the regeneration of a green roof's retention capacity via evapotranspiration**. Journal of Hydrology 523, 356–367, 2015.
- PORTO, B. C. **Respostas ecofisiológicas de *Andropogon lateralis* nees subsp. *Lateralis* (capim-caninha): variação ecotípica ou plasticidade fenotípica?** 2004. 98p. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.
- R Core Team (2015). **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 13 set. 2017.
- RAMBO, M. K. D. **Aproveitamento da casca de arroz para a produção de xilitol e sílica xerogel**. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Química. Área de Concentração em Química Analítica, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), 2009.
- RAMOS, A. M.; SANTOS, L. A. R. dos; FORTES, L. T. G. (Organizadores). **Normais Climatológicas do Brasil 1961 – 1990**. Brasília, DF: INMET, 465 p., 2009.
- RAO G. R.; SASTRY, A.R.K.; ROHATGI, P.K. **Nature and reactivity of silica available in rice husk and its ashes**. Bull. Master. Sci. 12:469-479, 1989.
- RICHARDSON, M. D.; KARCHER, D. E.; PURCELL, L. C. **Quantifying Turfgrass Cover Using Digital Image Analysis**. Crop Sci. 41:1884–1888 (2001).
- ROLA, M. O. R.; SILVA, R. F. da. **Vantagens da vermicompostagem sobre a compostagem natural**. Revista F@ciência, Apucarana-PR, ISSN 1984-2333, v.10, n. 1, p. 40 – 48, 2014.

- ROSSATO, M. S. **Os climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, tendências e tipologia.** Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-graduação em geografia, Porto Alegre: RS – BR, 240 f. 2011.
- ROTA, L. D.; PAULETTI, G. F. **Efeito da adição de casca de arroz em substrato comercial a base de turfa na produção de mudas de *Viola tricolor* L.** Revista Brasileira de Agrociência: Pelotas, v.14, n.3-4, p.45-48, jul-set, 2008
- ROWE, D. B.; MONTERUSSO, M. A.; RUGH, C. L. **Assessment of Heat-expanded Slate and Fertility Requirements in Green Roof Substrates.** HortTechnology: July–September 16(3), 2006.
- SAILOR, D.J.; HAGOS, M. **An updated and expanded set of thermal property data for green roof growing media.** Energy and Buildings, pp. 2298–2303, 2011.
- SAILOR, D.J.; HUTCHINSON, D.; BOKOVOY, L. **Thermal property measurements for ecoroof soils common in the western U.S.** Energy and Buildings 40, 1246–1251, 2008.
- SANTOS, C. S. dos; SILVA, P. F. da; SANTOS, J. C. C. dos; SILVA, C. H. da; BARROS, A. C. **Estimativa da umidade na capacidade de campo em vasos e em laboratório.** Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. Mossoró – RN - Brasil, v. 8, n. 2, p.151 - 160, abr-jun, 2013.
- SILVA, E. A. da; OLIVEIRA, G. C. de; SILVA, B. M.; COGO, F. D.; OLIVEIRA, L. M. de. **Avaliação da disponibilidade de água e ar em substratos agrícolas à base de turfa e casca de arroz carbonizada.** Tecnol. & Ciên. Agropec. João Pessoa, v.5, n.4, p.19-23, dez. 2011.
- SKINNER, S. **Proper Soil Selection For Garden Roofs: A Primer.** Design Cost Data, DC&D Technologies, 2005. Disponível em: <<http://www.gardenroof.net/sites/default/files/press/DCD%20Soils%2011-2005.pdf>>. Acesso em: 18 out. 2017.
- SNSA, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Águas pluviais: técnicas compensatórias para o controle de cheias urbanas.** Guia do profissional em treinamento, níveis 2 e 3 / Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte: ReCESA, 52 p. 2007.
- SORRILL, J. **Quality compost use in green roof construction.** WRAP: Waste & Resources Action Programme. Material change for a better environment, 2012. Disponível em: <<http://www.organics-recycling.org.uk/uploads/article1836/Using%20PAS%20100%20compost%20on%20Green%20Roofs.pdf>>. Acesso em: 26 nov. 2016.
- SOUZA, A. R. C. de; FERRAZ, R. C.; PEITER, M. X.; ROBAINA, A. D.; SCHWAB, N. T.; NEUHAUS, M.; BEATRIZ, L. **Atributos físicos da mistura entre casca de arroz carbonizada e solo da unidade São Pedro.** VII ENSub, Goiânia, Goiás, 2010.
- STOVIN, V.; POË A. S.; DE-VILLEA, S.; BERRETTA, C. **The influence of substrate and vegetation configuration on green roof hydrological performance.** Ecological Engineering 85, 159–172, 2015.

STOVIN, V.; VESUVIANO, G; KASMIN, H. **The Hydrological Performance of a Green Roof Test Bed under UK Climatic Conditions**. Journal of Hydrology, 414-415: 148-161, 2012.

SUTTON, R. K (Ed.). **Green Roof Ecosystems**. Ecological Studies: Springer. 2015.

TASSI, R.; TASSINARI, L. C. da S.; PICCILLI, D. G. A. PERSCH, C. G. **Telhado verde: uma alternativa sustentável para gestão das águas pluviais**. Ambiente Construído, v. 14, n.1, p. 139-154, jan./mar. 2014. Disponível em: <<http://www.seer.ufrgs.br/index.php/ambienteconstruido/article/view/38866/28753>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p. (Boletim Técnico, 5).

THURING, C. E.; BERGHAGE, R. D.; BEATTIE, D. J. **Green Roof Plant Responses to Different Substrate Types and Depths under Various Drought Conditions**. HortTechnology. April 2010 20(2). Disponível em: <<http://horttech.ashspublications.org/content/20/2/395.full.pdf+html>>. Acesso em: 21 jul. 2016.

TOWNSHEND, D.; DUGGIE, A. **Study on green roof application in Hong Kong**. Final Report. Architectural Services Department, 2007.

UFPR - UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. **O solo no meio ambiente**: abordagem para professores do ensino fundamental e médio e alunos do ensino médio. UFPR. Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Curitiba, 2007.

UGARTE, J.F. de O.; MONTE, M.B.M.; FRANÇA, S.C.A.; GRACIANO, F.P.R. **Comparação Estatística do Fator de Expansão de Concentrados de Vermiculita**. CETEM – Centro de Tecnologia Mineral, 2004. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/images/congressos/2004/CAC00280004.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2016.

UHL, M.; SCHIEDT, L. **Green Roof Storm Water Retention** –Monitoring Results. 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 2008. Disponível em: <https://web.sbe.hw.ac.uk/staffprofiles/bdgsa/11th_International_Conference_on_Urban_Drainage_CD/ICUD08/pdfs/317.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2016.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. **Urban Runoff: Low Impact Development**. Disponível em: <<https://www.epa.gov/polluted-runoff-nonpoint-source-pollution/urban-runoff-low-impact-development>>. Acesso em: 01 ago. 2016.

VAN WOERT, N. D.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A.; RUGH, C. L.; XIAO, L. **Watering Regime and Green Roof Substrate Design Affect Sedum Plant Growth**. Michigan State University, HortScience 40(3):659–664. 2005.

VAN WOERT, N. D.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A.; RUGH, C. L.; XIAO, L. **Watering Regime and Green Roof Substrate Design Affect Sedum Plant Growth**. HortScience, 40(3): 659–664. 2005.

VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. **The moisture equivalent as a measure of the field capacity of soils.** Soil Sci., 32:181-193, 1931. Disponível em: <http://journals.lww.com/soilsci/Citation/1931/09000/THE_MOISTURE_EQUIVALENT_A_S_A_MEASURE_OF_THE_FIELD.3.aspx>. Acesso em: 14 set. 2017.

VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 3ª Ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2005.

WALTER, J. P.; ROSSATO, M. V. **Destino do resíduo casca de arroz na microrregião de Restinga Seca – RS: Um enfoque à responsabilidade socioambiental.** VI Congresso Nacional de Excelência em Gestão, 2010. Disponível em: <http://www.inovarse.org/sites/default/files/T10_0261_1040.pdf>. Acesso em: 07 set. 2016.

WANG, X.; TIAN, Y.; ZHAO, X. **The influence of dual-substrate-layer extensive green roofs on rainwater runoff quantity and quality.** Science of the Total Environment 592, 465–476, 2017.

WONG, G. K. L.; JIM, C. Y. **Identifying keystone meteorological factors of green-roof stormwater retention to inform design and planning.** Landscape and Urban Planning 143, 173–182, 2015.

YIO, M.H.N., STOVIN, V., WERDIN, J., VESUVIANO, G. **Experimental analysis of green roof substrate detention characteristics.** Water Sci. Technol. 68 (7), 1477, 2013.

YOUNG, T. **The Influence of Green Roof Substrate Composition on Plant Growth and Physiological Health.** University of Sheffield - Department of Animal and Plant Science: Doctoral Dissertation. Sheffield - England. 233 p., 2014.

YOUNG, T., CAMERON, D.D., SORRILL, J., EDWARDS, T., PHOENIX, G.K. **Importance of different components of green roof substrate on plant growth and physiological performance.** Urban For. Urban Green. 13 (3), 507–516, 2014.

YU, C.; KAMBOJ, S.; WANG, C.; CHENG, J-J. **Data collection handbook to support modelling impacts of radioactive material in soil and building structures.** Environmental Science Division, Argonne National Laboratory, United States Department of Energy, 2015.

ZANOTTI, B. H.; SILVA, C. A.; MUELLER, G. S.; GONTOW, M.; TATEOKA, S. S. **Parque linear como medida de manejo de águas pluviais: Estudo de caso Córrego Ponte Alta – Taboão da Serra.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – PHA, 2014.

ZORZETO, T. Q. **Caracterização física e química de substratos para plantas e sua avaliação no rendimento do morangueiro (*Fragaria* χ *ananassa* Duch.).** Dissertação de mestrado. Instituto Agrônômico, Curso de Pós-graduação em Agricultura Tropical e Subtropical, 104 p. Campinas, 2011.

ZORZETO, T. Q.; DECHEN, S. C. F.; ABREU, N. F. de; FERNANDES JÚNIOR, F. **Caracterização física de substratos para plantas.** Solos e Nutrição de plantas. Bragantia, Campinas, v. 73, n. 3, p.300-311, 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v73n3/aop_brag_0086.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2016.

APÊNDICES

Apêndice A - Propriedades químicas dos substratos formulados para uso em telhados verdes extensivos

TRAT. (ID)	pH (H ₂ O)	P Leitura	N (%)	P (mg/L)	K Leitura	K (mg/L)	K (cmol/L)	Índice SMP	M.O. Leitura	M.O. (%)	CTC Efet.	CTC Ph 7
SC1	8,35	0,6	0,14	370,3	148	592	1,514	6,9	2,8	2,8	10,4	12
SC2	7,26	0,6	0,24	370,3	134	536	1,371	6,7	4,8	4,8	14,2	16,2
SC3	7,01	0,5	0,21	383,5	140	560	1,432	6,8	4,2	4,2	13,4	15,1
SC4	6,82	1,0	0,20	333,3	116	464	1,187	6,2	4	4	13,1	16,6
SC5	6,56	1,1	0,18	326,4	115	460	1,176	6,2	3,6	3,6	12,6	16,1
SN3	6,98	0,3	0,26	420,5	150	600	1,535	6,3	5,2	5,2	14,7	17,8
SN4	6,43	0,7	0,245	359,2	116	464	1,187	6,2	4,9	4,9	13,6	17,1
SN5	6,65	1,2	0,235	320,1	115	460	1,176	6,2	4,7	4,7	12,3	15,8
SS6	6,7	3,8	0,185	236,7	89	356	0,91	5,9	3,7	3,7	11,4	16,3
SOLO	5,84	87,3	0,085	9,8	34	136	0,348	6	1,7	1,7	6,3	10,6
SCOM	5,54	1,3	0,97	314,3	200	800	2,046	5,4	19,4	19,4	62,9	71,5
VERM.	5,9	0,2	0,71	449,8	200	800	2,046	5,8	14,2	14,2	30,9	36,4
Tratam. (ID)	CE (mS/cm)	Argila (%)	Textura	Al (cmol/L)	Ca (cmol/L)	Mg (cmol/L)	H+Al (cmol/L)	Saturação bases (%)	Saturação Al (%)	Relações Ca/Mg	Relações (Ca+Mg)/K	Relações (K/(Ca+Mg)1/2)
SC1	0,39	6	4	0	5,304	3,617	1,6	87	0	1,5	5,9	0,507
SC2	0,37	14	4	0	7,731	5,1	2	87,7	0	1,5	9,4	0,383
SC3	0,38	13	4	0	6,921	5,01	1,7	88,5	0	1,4	8,3	0,415
SC4	0,35	17	4	0	6,922	5,002	3,5	79	0	1,4	10	0,344
SC5	0,38	20	4	0	6,385	5,02	3,5	78,1	0	1,3	9,7	0,348
SN3	0,44	19	4	0	7,707	5,448	3,1	82,5	0	1,4	8,6	0,423
SN4	0,37	24	3	0	7,046	5,391	3,5	79,7	0	1,3	10,5	0,337
SN5	0,39	24	3	0	6,859	4,292	3,5	78	0	1,6	9,5	0,352
SS6	0,41	28	3	0	6,557	3,925	4,9	69,9	0	1,7	11,5	0,281
SOLO	0,14	30	3	0,1	3,995	1,877	4,4	58,7	1,6	2,1	16,9	0,144
SCOM	1,93	5	4	0,1	51,409	9,328	8,7	87,8	0,2	5,5	29,7	0,263
VERM.	-	8	4	0	16,225	12,649	5,5	84,9	0	1,3	14,1	0,381

ID: Identificação; CE: Condutividade elétrica obtida em solução 1:5 (v/v); pH: determinado em água, diluição 1:5 (v/v); VERM: Vermicomposto.

Apêndice B - Propriedades físicas dos substratos para uso em telhados verdes extensivos – comparação de médias através do teste de Tukey

PROP.	DU	DS	UA	PT	EA	AD	AFD	AT	AR	CRA10	CRA50	CRA100
TRAT	(Kg.m⁻³)	(Kg.m⁻³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
SC1	679.37 f	576.28 f	15.203 b	71.180 b	24.500 b	23.163 a	21.470 a	1.690 f	23.520 bcde	46.680 b	25.210 ef	23.520 bcde
SC2	724.78 ef	623.00 ef	14.060 bc	68.546 bc	32.846 a	14.686 bc	13.016 cd	1.670 f	21.020 e	35.703 cd	22.690 f	21.020 e
SC3	877.01 d	769.33 d	12.276 d	66.600 bcd	21.470 bc	21.006 a	18.350 abc	2.653 de	24.120 bcde	45.126 b	26.776 de	24.120 bcde
SC4	945.44 d	822.26 d	13.030 cd	62.673 cd	18.810 cd	19.156 ab	16.090 bc	3.066 cd	24.703 bcd	43.860 bc	27.770 cde	24.703 bcd
SC5	1042.1 c	911.426 c	12.546 d	60.350 de	13.923 def	20.560 ab	16.636 abc	3.926 b	25.866 bc	46.426 b	29.790 bcd	25.866 bc
SN3	796.95 e	692.49 e	13.120 cd	65.116 bcd	30.880 a	11.613 c	9.383 d	2.223 ef	22.626 de	34.236 d	24.850 ef	22.626 de
SN4	902.4 d	786.60 d	12.833 d	63.367 cd	22.780 bc	17.310 abc	14.410 bcd	2.903 de	23.273 cde	40.586 bcd	26.180 ef	23.273 cde
SN5	1035.90 c	911.27 c	12.030 d	60.706 de	16.416 d	17.736 ab	13.960 bcd	3.780 bc	26.553 b	44.293 b	30.340 bcd	26.553 b
SS6	1133.97 b	991.86 b	12.530 d	53.956 e	9.466 f	18.090 ab	14.073 bcd	4.020 b	26.400 bc	44.486 b	30.416 bc	26.400 bc
SOLO	1262.49 a	1150.98 a	8.830 e	55.440 e	10.380 ef	18.693 ab	13.043 cd	5.650 a	26.373 bc	45.063 b	32.026 b	26.373 bc
SCOM	651.84 f	315.99 g	51.523 a	80.753 a	14.620 de	23.223 a	18.850 ab	4.373 b	42.903 a	66.126 a	47.276 a	42.903 a

TRAT: Tratamentos; PROP: Propriedades físicas; DU: Densidade úmida; DS: Densidade seca; UA: Umidade atual; PT: Porosidade total; EA: Espaço de aeração; AFD: Água facilmente disponível; AT: Água tamponante; AR: Água remanescente; AD: água disponível que pode ser obtida pela soma de AFD+AT; CRA_{10,50,100}: Capacidade de retenção de água sob sucção de 10, 50 e 100 cm de coluna de água determinado em base volumétrica - v/v.

* Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Apêndice C - Propriedades físicas dos substratos para uso em telhados verdes extensivos – Comparação de médias através do teste de Scott-Knott

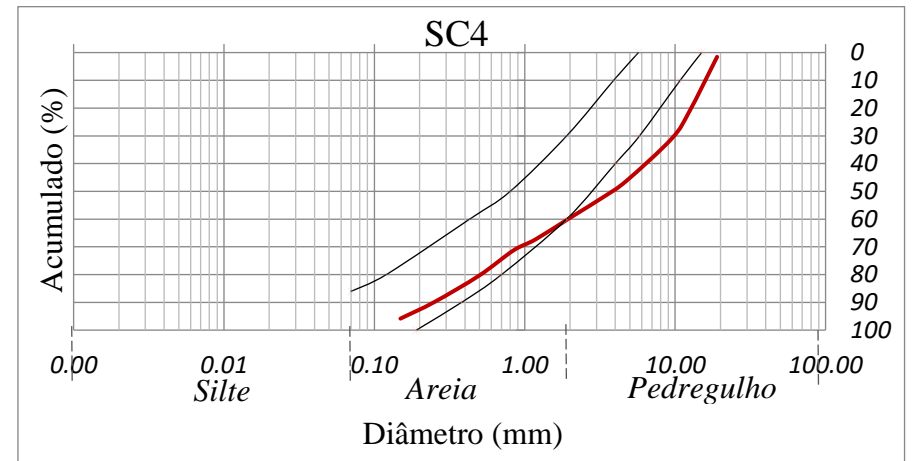
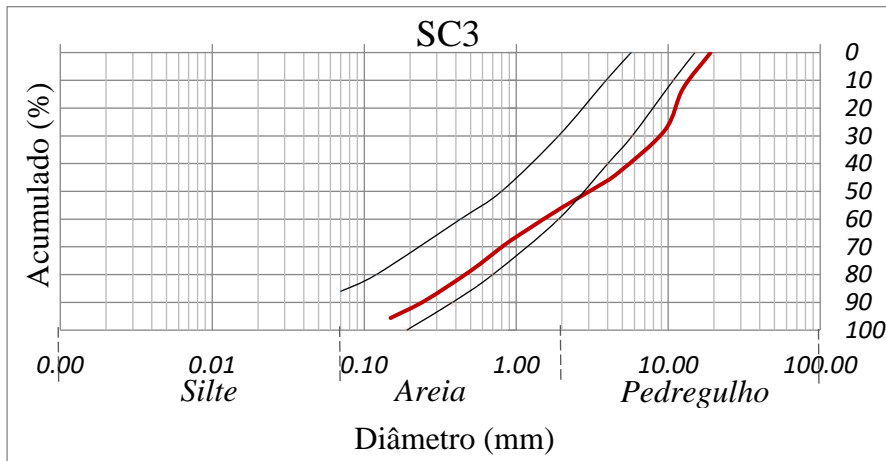
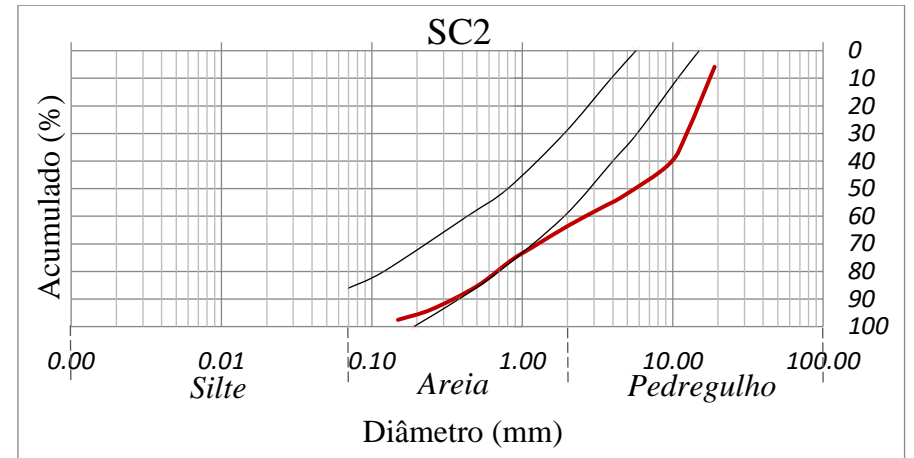
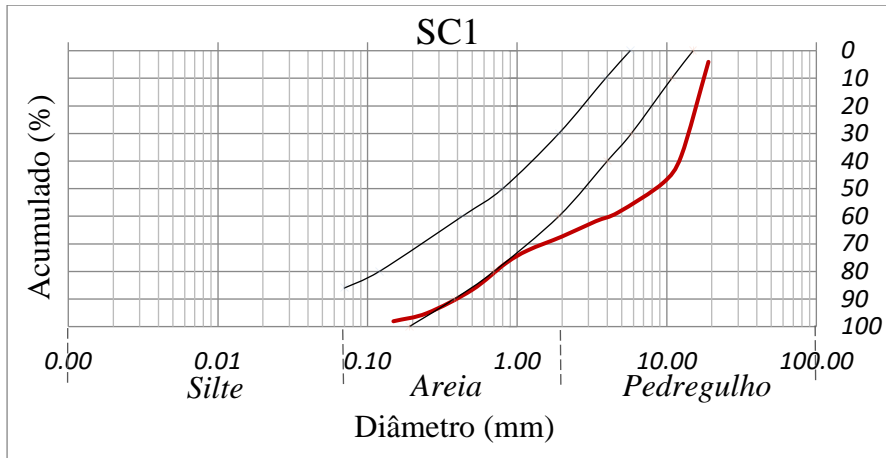
PROP.	DU	DS	UA	PT	EA	AD	AFD	AT	AR	CRA10	CRA50	CRA100
TRAT.	(Kg.m ⁻³)	(Kg.m ⁻³)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
SC1	679.37 h	576.28 h	15.203 b	71.180 b	24.500 b	23.163 a	21.470 a	1.690 e	23.520 c	46.680 b	25.210 d	23.520 c
SC2	724.78 g	623.00 g	14.060 c	68.546 b	32.846 a	14.686 c	13.016 c	1.670 e	21.020 d	35.703 c	22.690 e	21.020 d
SC3	877.01 e	769.33 e	12.276 e	66.600 c	21.470 b	21.006 a	18.350 b	2.653 c	24.120 c	45.126 b	26.776 c	24.120 c
SC4	945.44 d	822.26 d	13.030 d	62.673 d	18.810 c	19.156 b	16.090 b	3.066 c	24.703 b	43.860 b	27.770 c	24.703 b
SC5	1042.1 c	911.426 c	12.546 e	60.350 d	13.923 d	20.560 a	16.636 b	3.926 b	25.866 b	46.426 b	29.790 b	25.866 b
SN3	796.95 f	692.49 f	13.120 d	65.116 c	30.880 a	11.613 c	9.383 d	2.223 d	22.626 c	34.236 c	24.850 d	22.626 c
SN4	902.4 e	786.60 e	12.833 d	63.367 d	22.780 b	17.310 b	14.410 c	2.903 c	23.273 c	40.586 b	26.180 c	23.273 c
SN5	1035.90 c	911.27 c	12.030 e	60.706 d	16.416 c	17.736 b	13.960 c	3.780 b	26.553 b	44.293 b	30.340 b	26.553 b
SS6	1133.97 b	991.86 b	12.530 e	53.956 e	9.466 e	18.090 b	14.073 c	4.020 b	26.400 b	44.486 b	30.416 b	26.400 b
SOLO	1262.49 a	1150.98 a	8.830 f	55.440 e	10.380 e	18.693 b	13.043 c	5.650 a	26.373 b	45.063 b	32.026 b	26.373 b
SCOM	651.84 h	315.99 i	51.523 a	80.753 a	14.620 d	23.223 a	18.850 b	4.373 b	42.903 a	66.126 a	47.276 a	42.903 a

TRAT: Tratamentos; PROP: Propriedades físicas; DU: Densidade úmida, DS: Densidade seca; UA: Umidade atual; PT: Porosidade total; EA: Espaço de aeração; AFD: Água facilmente disponível; AT: Água tamponante; AD: Água disponível; CRA10,50,100: Capacidade de retenção de água sob sucção de 10, 50 e 100 cm de coluna de água determinado em base volumétrica - v/v.

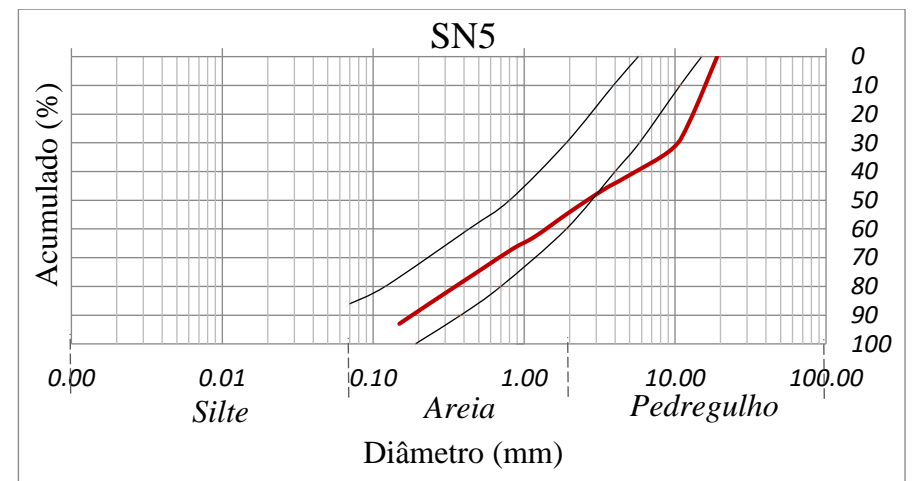
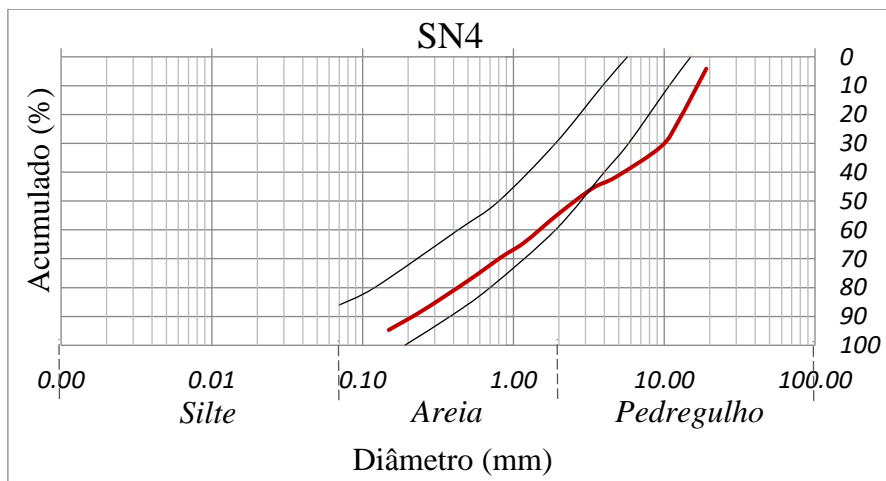
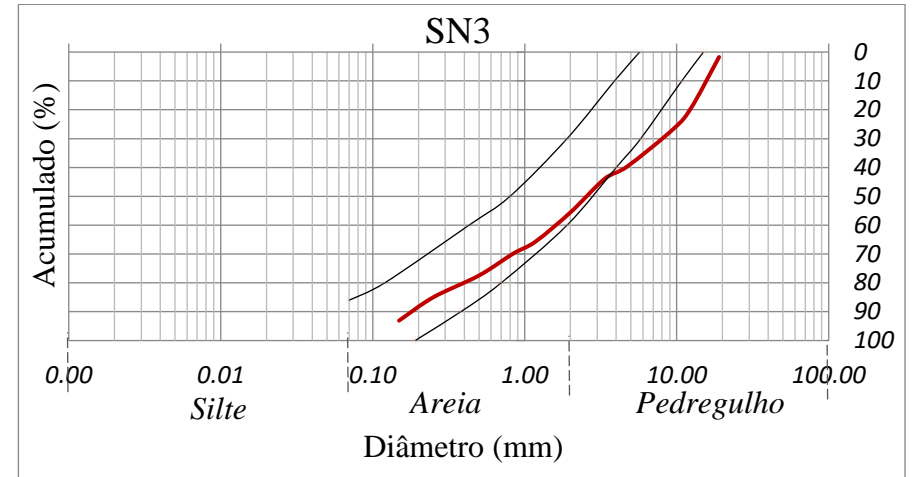
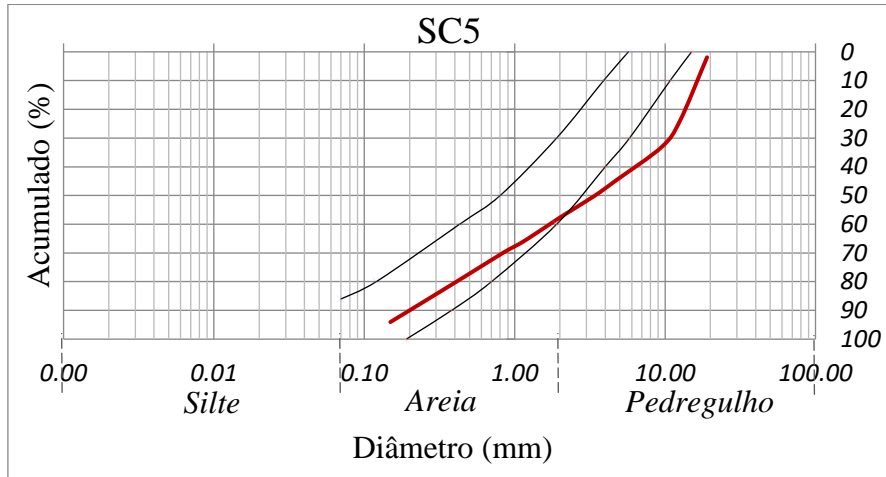
* Médias seguidas pela mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Apêndice D - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas

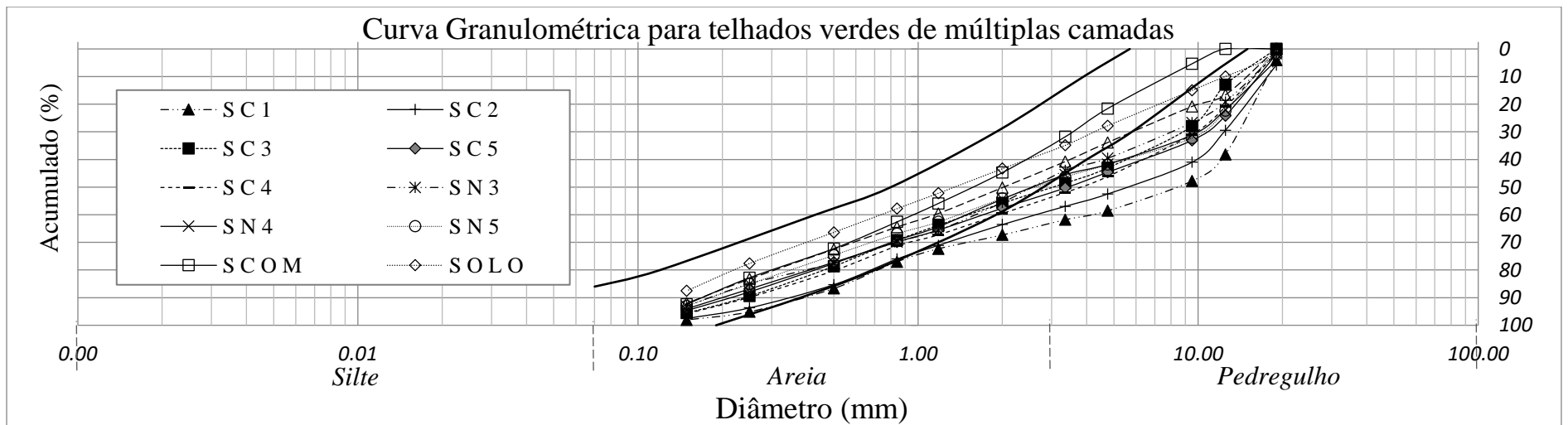
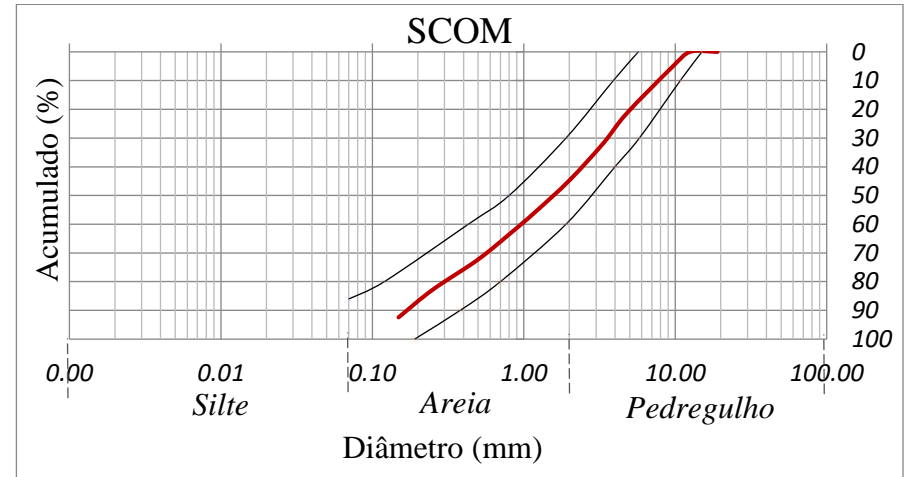
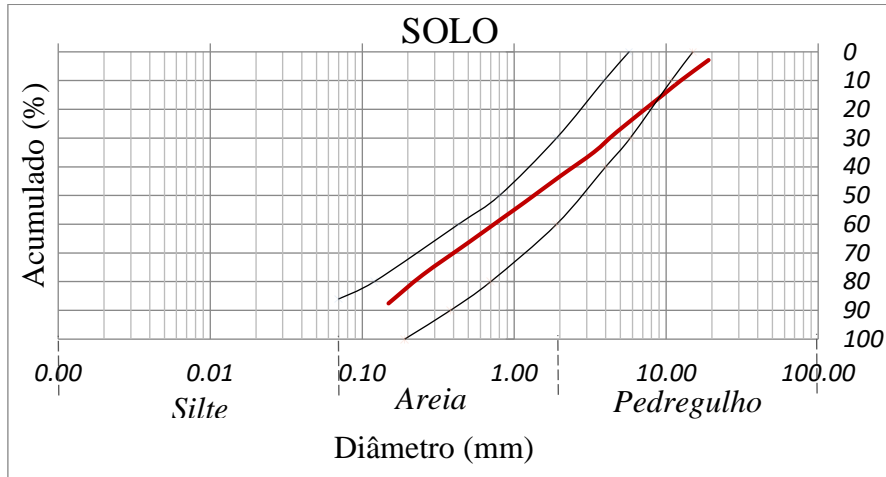
Apêndice D.1 - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas – Tratamentos SC1, SC2, SC3 e SC4



Apêndice D.2 - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas – Tratamentos SC5, SN3, SN4 e SN5

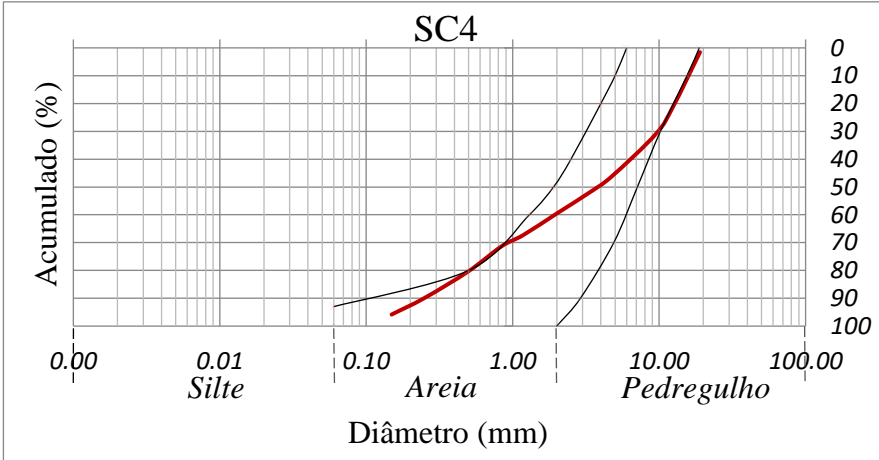
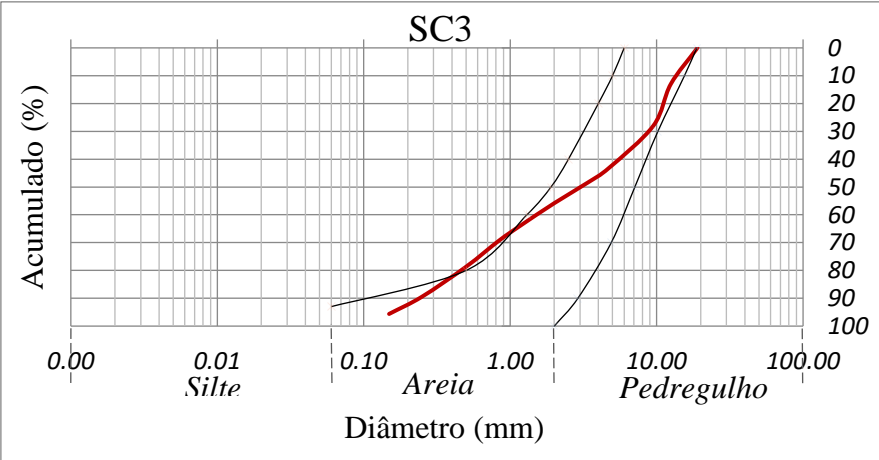
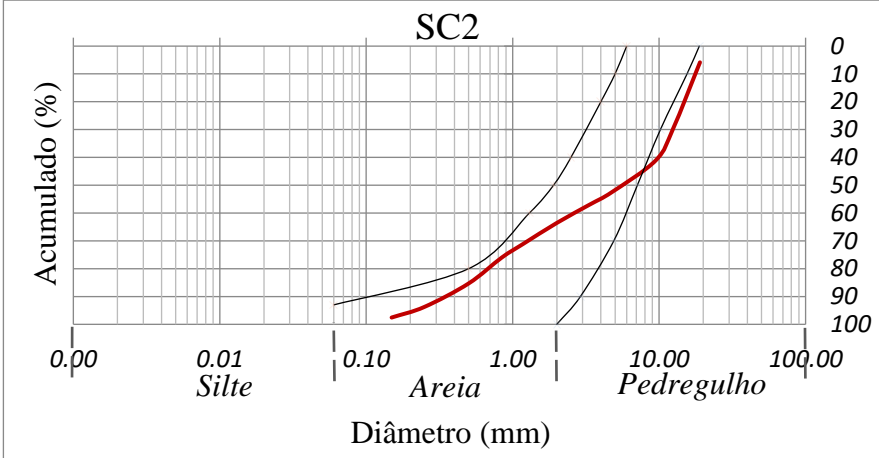
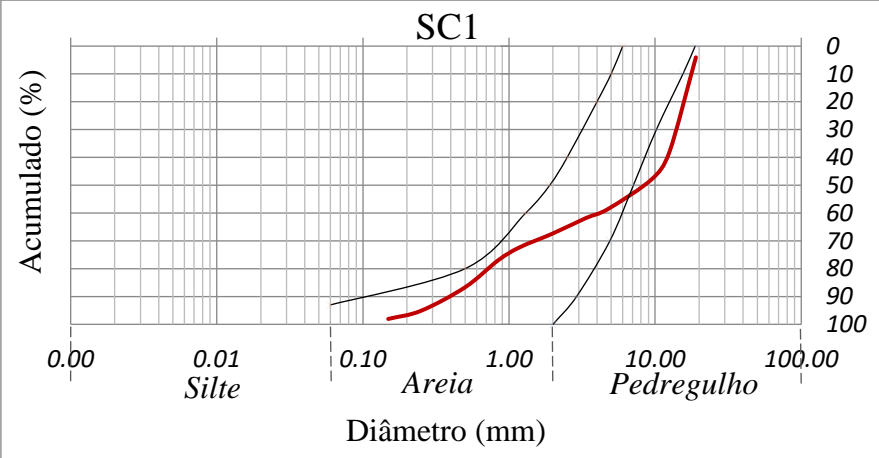


Apêndice D.3 - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de múltiplas camadas – Tratamentos SOLO, SCOM, GERAL

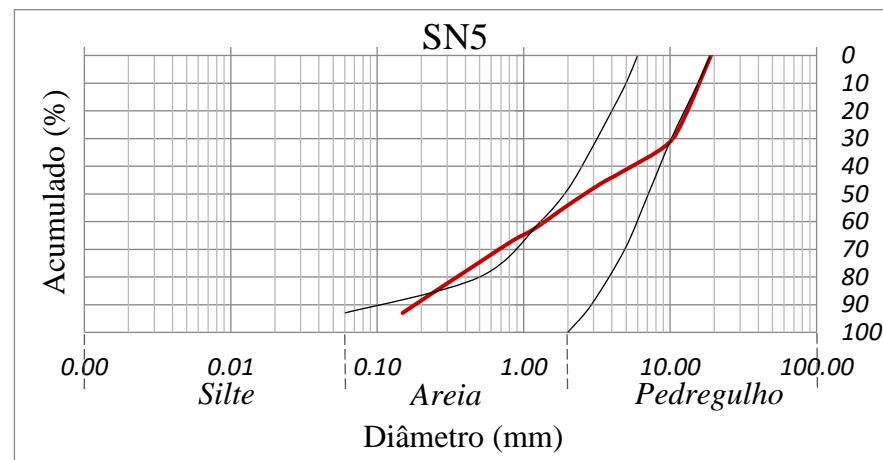
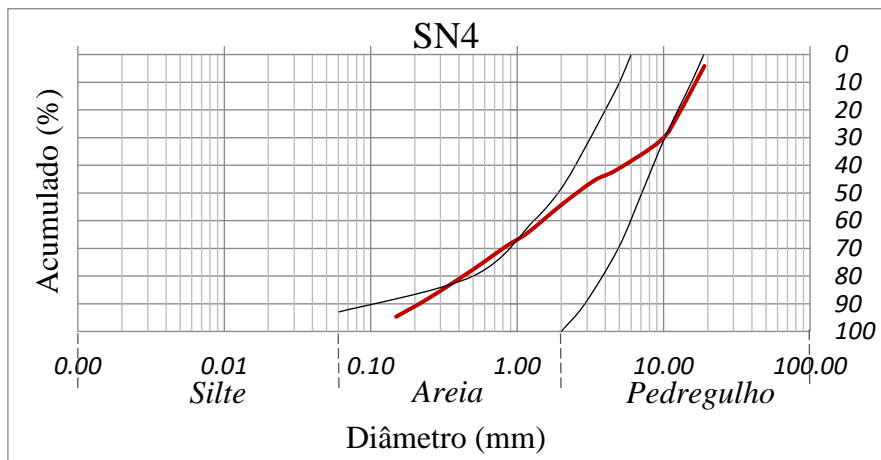
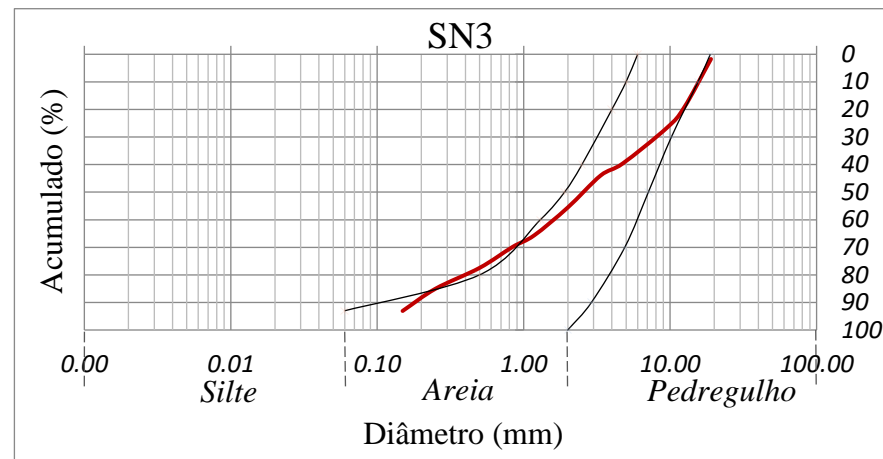
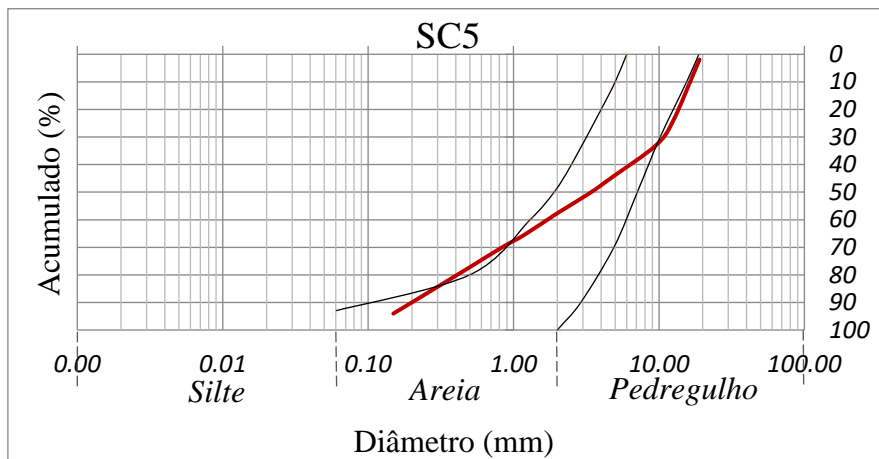


Apêndice E - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de camada única

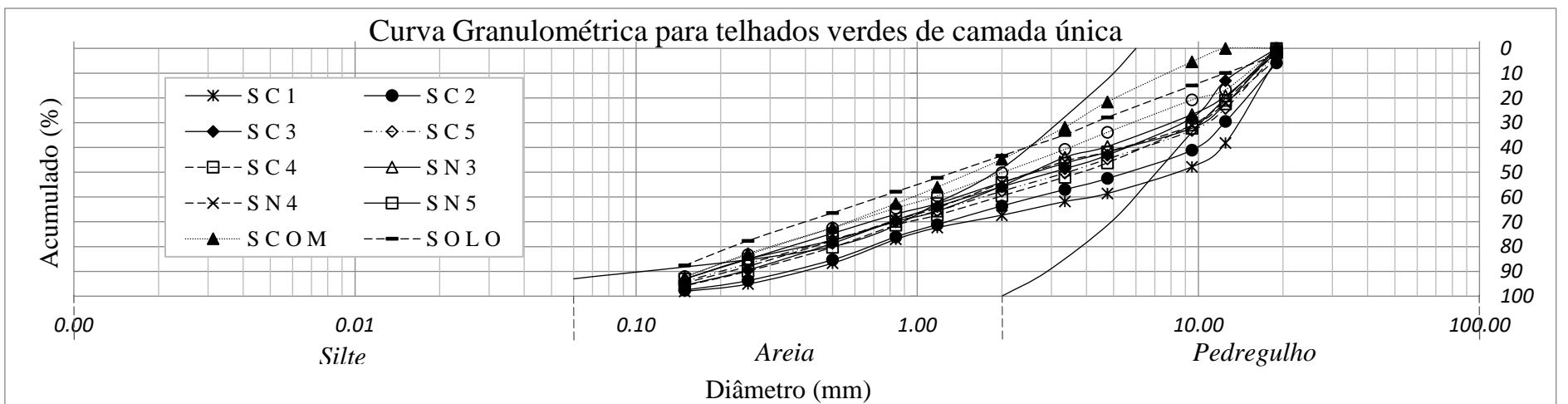
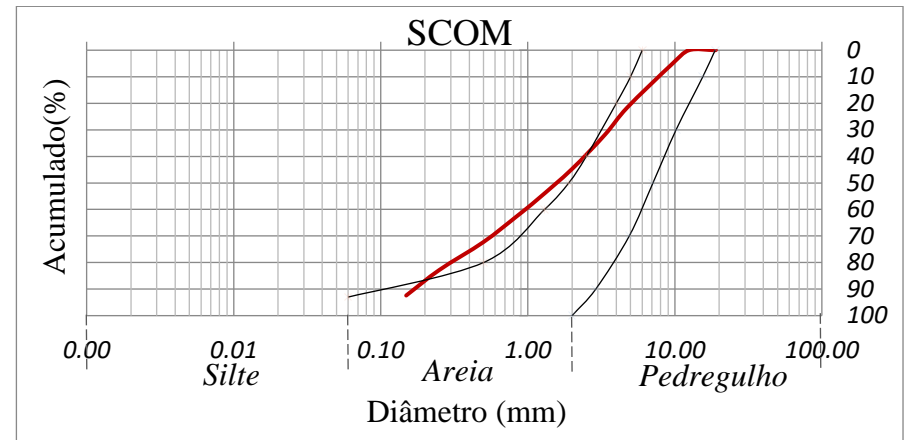
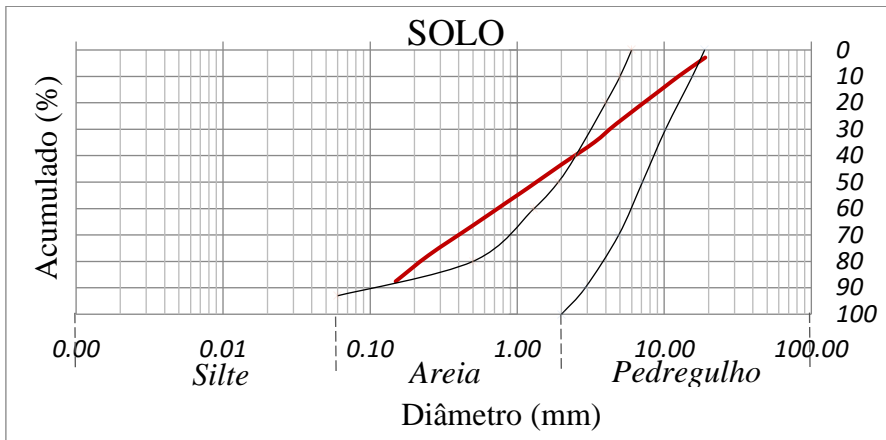
Apêndice E.1 - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de camada única – Tratamentos SC1, SC2, SC3 e SC4



Apêndice E.2 - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de camada única – Tratamentos SC5, SN3, SN4 e SN5



Apêndice E.3 - Curvas granulométricas para telhados verdes extensivos de camada única – Tratamentos SOLO, SCOM e GERAL



Apêndice F - Variação da cobertura vegetal dos substratos estudados

Apêndice F.1 - Variação da cobertura vegetal do substrato SC1 (50% CAC, 20% RCC, 15% Vermiculita e 15% Vermicomposto)



Apêndice F.2 - Variação da cobertura vegetal do substrato SC2 (40% CAC, 10% solo, 20% RCC, 15% Vermiculita e 15% Vermicomposto)



Apêndice F.3 - Variação da cobertura vegetal do substrato SC3 (30% CAC, 20% solo, 20% RCC, 15% Vermiculita e 15% Vermicomposto)



Apêndice F - Variação da cobertura vegetal dos substratos estudados

Apêndice F.4 - Variação da cobertura vegetal do substrato SC4 (20% CAC, 30% solo, 20% RCC, 15% Vermiculita e 15% Vermicomposto)



Apêndice F.5 - Variação da cobertura vegetal do substrato SC5



Apêndice F.6 - Variação da cobertura vegetal do substrato SN3



Apêndice F - Variação da cobertura vegetal dos substratos estudados

Apêndice F.7 - Variação da cobertura vegetal do substrato SN4



Apêndice F.8 - Variação da cobertura vegetal do substrato SN5



Apêndice F.9 - Variação da cobertura vegetal do substrato SOLO



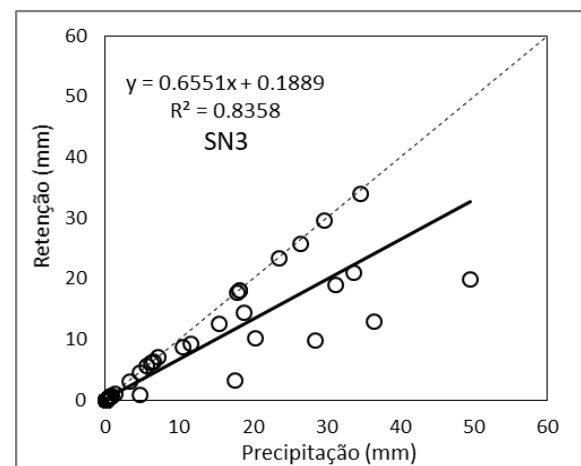
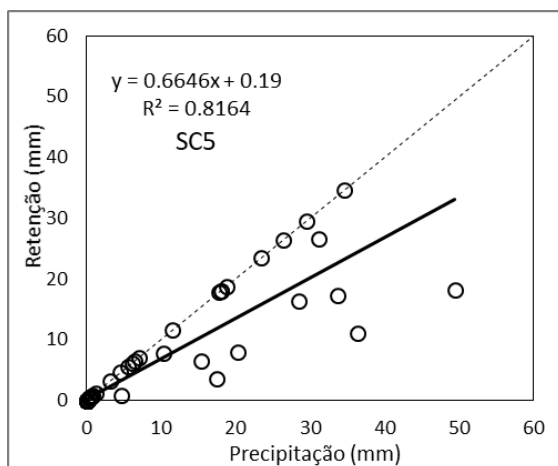
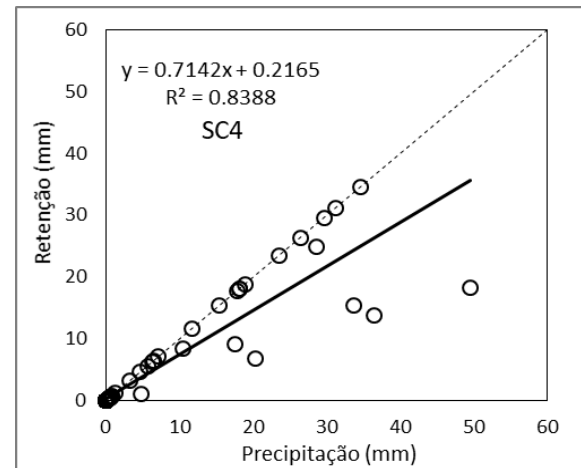
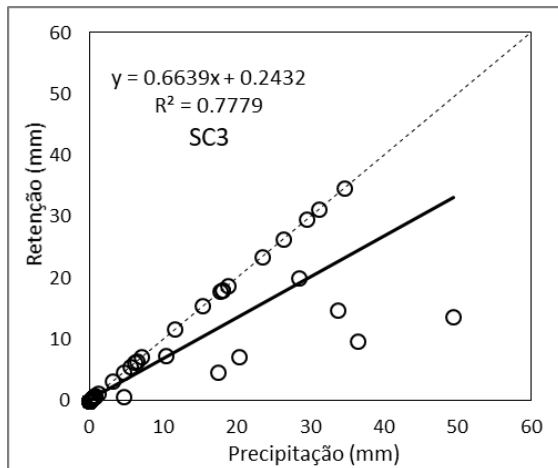
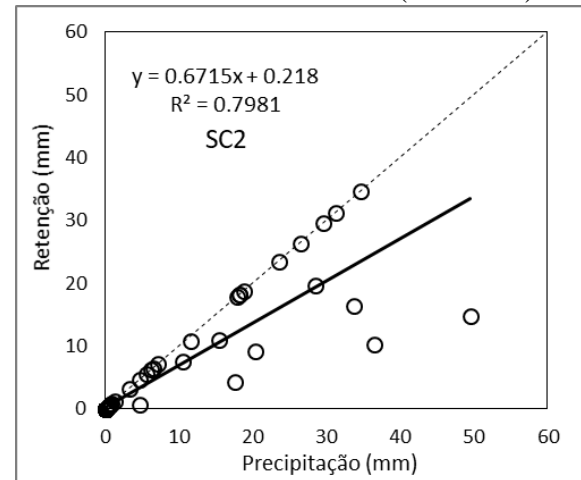
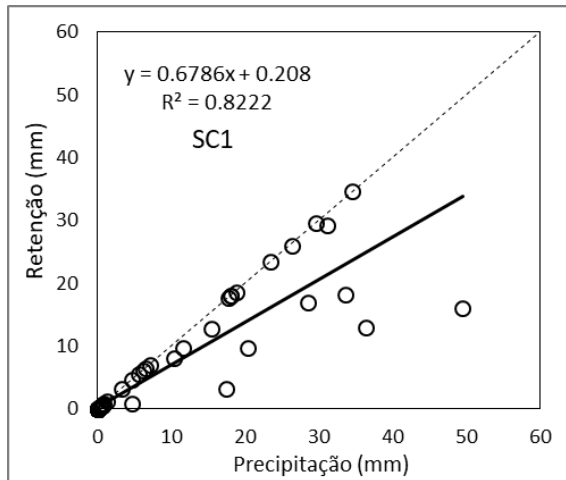
Apêndice F - Variação da cobertura vegetal dos substratos estudados

Apêndice F.10 - Variação da cobertura vegetal do substrato SCOM



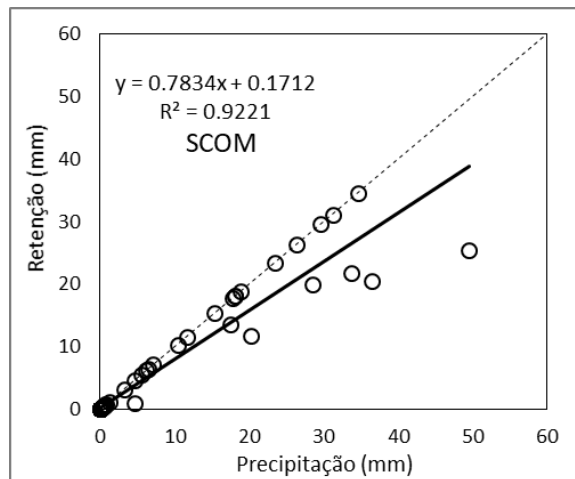
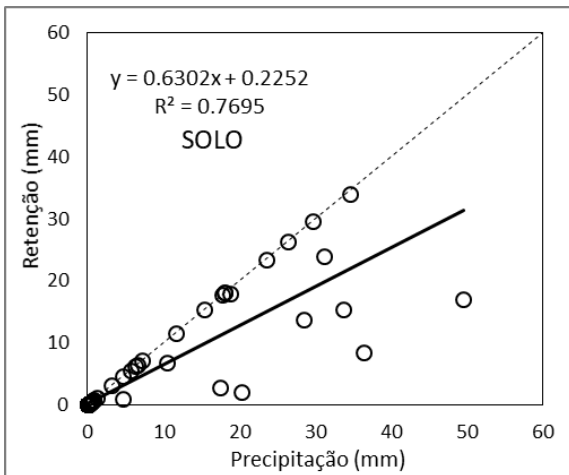
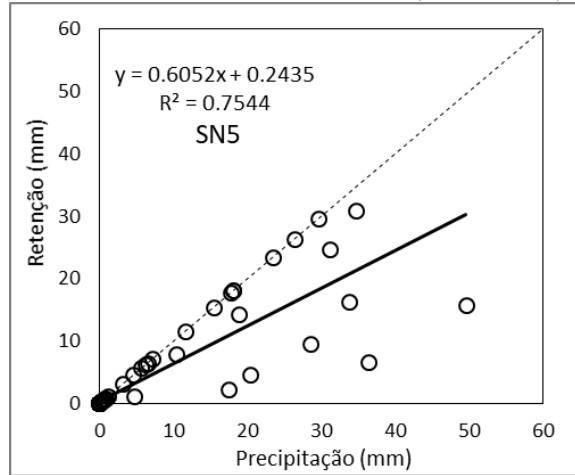
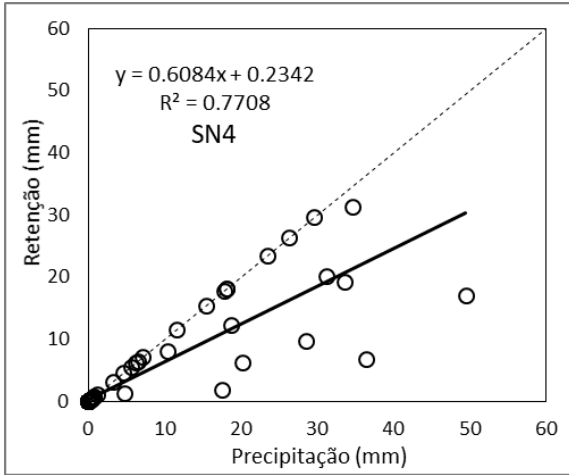
Apêndice G - Relação entre o volume precipitado e a retenção de água para cada substrato estudado

(Continua)



Apêndice G - Relação entre o volume precipitado e a retenção de água para cada substrato estudado

(Conclusão)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Apêndice H – Escoamento mediano dos tratamentos (dm³.dm⁻³) - Teste de Kruskal-Wallis para comparação entre os tratamentos e os eventos de chuva

TRAT.	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SN3	SN4	SN5	SOLO	SCOM
EVENTO	(L.m ⁻²)									
Evento 1	2.572 A de	4.424 A efg	0.00 AB g	0.00 B h	8.951 A d	2.778 AB fg	0.00 B g	0.00 AB ij	0.00 AB ef	0.00 AB ef
Evento 2	3.807 ABC d	4.115 A ef	4.012 AB ef	3.601 BC e	3.909 AB d	3.858 ABC fg	3.395 C ef	3.601 ABC fg	3.652 BC d	3.807 ABC cd
Evento 3	0.06 A de	0.00 B i	0.00 AB g	0.00 B h	0.00 B e	0.00 AB g	0.00 B g	0.00 AB hij	0.00 B f	0.00 B f
Evento 4	1.852 AB de	0.823 AB ghi	0.00 AB g	0.00 B h	0.00 B e	2.212 A fg	0.00 AB g	0.00 AB ij	0.00 AB ef	0.00 B f
Evento 5	0.360 A e	0.00 B i	0.00 B g	0.00 B h	0.00 B e	0.617 A fg	0.00 B g	0.00 AB j	0.00 B f	0.00 B f
Evento 6	1.955 CDE de	0.00 DE hi	0.00 E g	0.00 E g	4.63 BCDE d	12.088 AB de	11.060 A cd	6.501 ABC fg	7.202 ABCD d	0.00 E ef
Evento 7	14.249 AB bc	13.272 ABC cd	12.912 ABC cd	8.385 BC d	13.992 ABC c	14.198 ABC fg	15.689 A bc	15.226 AB ef	14.712 AB c	3.909 C de
Evento 8	0.206 BC e	0.00 BC i	0.00 C g	0.00 C h	0.00 C e	4.372 A ef	6.584 A de	4.527 A fg	0.772 B e	0.00 C f
Evento 9	11.523 BCD c	8.848 CD de	8.436 CD de	3.549 D e	12.037 BC c	18.518 A ab	18.673 A b	18.930 A bcd	14.815 AB c	8.539 CD cd
Evento 10	0.00 BC e	0.00 BC i	0.00 BC g	0.00 C h	0.00 C e	0.463 AB fg	3.241 A ef	3.704 A gh	0.669 BC ef	0.00 BC ef
Evento 11	23.457 BCD ab	26.080 BC ab	26.698 AB ab	22.582 CD bc	25.360 BC ab	23.40 BCD abc	29.578 A a	29.733 A ab	27.932 AB a	15.947 D ab
Evento 12	25.103 AB ab	26.029 AB ab	26.955 AB ab	25.154 AB ab	23.302 B ab	25.000 AB ab	27.984 A a	27.572 A abc	25.926 AB ab	23.920 B ab
Evento 13	33.436 A a	34.722 A a	35.905 A a	31.224 AB a	31.224 AB a	29.475 AB a	32.510 A a	33.745 A a	32.510 AB a	24.126 B a
Evento 14	2.21 ABCD de	2.881 AB fgh	3.035 ABC f	2.006 CDE f	2.572 ABCD d	1.646 DE fg	2.315 BCD f	2.47 BCDE ghi	3.549 A d	0.103 E ef
Evento 15	15.535 ABC bc	17.284 AB bc	18.981 AB bc	18.313 A c	16.409 AB bc	12.551 BC cd	14.455 ABC bc	17.335 AB cde	18.364 AB bc	11.883 C bc
Evento 16	10.494 BCD c	11.111 BCD cd	13.117 BC cd	13.426 ABC d	12.397 BCD c	10.082 CD de	13.992 ABC cd	15.741 AB de	18.210 A c	8.642 D cd

Medianas seguidas de mesma letra maiúscula na linha (substratos) e minúscula na coluna (eventos) não diferem estatisticamente pelo Teste de Kruskal-Wallis, com 5% de significância.

Apêndice I - Parâmetros físicos de qualidade da água (sólidos totais, cor aparente e turbidez)

Substrato	Sólidos Totais (mg.L-1)									
	Evento 3	Evento 9	Evento s/n	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
SC1	1595,5	789	362	701	842,5	719	472	459	404	517
SC2	1900	861	302	1430	1007	1030	563	526	556	666
SC3	1790	833	234	2072	1645	2040	764	981	1047	950
SC4	2142,5	1354	359	1203	2073,5	1614	1120	1207	1529	1417
SC5	1494	949	305	2047	1640,5	2545	918	1481	1694	1722
SN3	1732	1130	483	1144	1160	1099	594	539	595	530
SN4	2015	736	323	993	821,5	717	419	464	488	317
SN5	1944,5	1302	391	2899	1955,5	1942	1049	1074	1258	1138
SOLO	724,5	180	107	431	310,5	182	54	87	47	98
SCOM	4641	2344	1053	2798	2883	2618	2048	1184	1348	1704
Substrato	Cor Aparente (µC)									
	Evento 3	Evento 9	Evento s/n	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
SC1	-	994	400,4	384,2	562,6	1767,5	1331	709	650	730
SC2	-	1195	321	520,3	382,8	4470	2183	1483	1530	1640
SC3	-	1993	425	347,1	303,3	10907	3945	3752	4090	4060
SC4	-	2586	568	280,4	295,8	7717,5	4766	4737	5750	4820
SC5	-	2259	660	211,4	211,7	15740	4869	5835	7275	6675
SN3	-	2428	780	334	375,1	3755	2621	1582	1520	1130
SN4	-	1100	580	280,2	272,9	2237,5	1623	1067	1130	501
SN5	-	3161	1153	899,2	303,8	11535	6035	4289	4600	3950
SOLO	-	275,2	154,3	48	55,4	1020	480,7	319,8	190	173
SCOM	-	262,9	222,2	2257,7	2373,3	224,3	306,7	253,6	207	172
Substrato	Turbidez (NTU)									
	Evento 3	Evento 9	Evento s/n	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
SC1	-	0,0	1,2	2,2	0,0	0,4	2,3	1,8	1,0	1,0
SC2	-	22,9	12,3	38	44,5	61,5	48	65,2	53	46
SC3	-	57,8	22,6	63,1	72,2	66,2	89	116	93	92
SC4	-	74,3	27,8	82,5	68,3	79,3	91,2	112	85	89
SC5	-	83,0	36,5	79	85,2	54,8	103	103	79	85
SN3	-	34,1	27,0	45,3	35,7	40,2	45,1	54	41	32
SN4	-	38,7	25,7	66,6	58,3	66,4	52,3	64,3	58	11
SN5	-	90,5	56,7	50,4	75,8	64,4	109	118	95	94
SOLO	-	24,3	14,5	74,1	63	65,8	42,7	44,6	27	23
SCOM	-	1,8	1,0	5,2	2,3	2,4	4,6	2,3	2,0	1,0

Apêndice J - Parâmetros químicos de qualidade da água (pH, condutividade e fósforo total)

Substrato	pH									
	Evento 3	Evento 9	Evento s/n	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
SC1	-	8,04	8,09	7,98	8,04	7,76	7,66	7,47	7,86	7,54
SC2	-	7,42	7,74	7,55	7,5	7,23	7,09	7,28	7,45	7,09
SC3	-	7,28	7,58	7,57	7,4	7,1	6,96	7,05	7,44	7,28
SC4	-	7,19	7,5	7,72	7,46	7,33	7,15	7,12	7,48	7,19
SC5	-	7,13	7,46	7,39	7,42	7,19	6,98	7,03	7,31	7,16
SN3	-	7,3	7,56	7,52	7,65	7,31	7,18	6,98	7,58	7,22
SN4	-	7,4	7,45	7,29	7,36	7,17	6,95	6,84	7,51	7,25
SN5	-	7,22	7,57	7,5	7,67	7,42	7,17	7,2	7,6	7,35
SOLO	-	6,71	7,05	6,87	7,13	6,79	6,41	6,71	7,34	7,01
SCOM	-	6,41	6,65	6,36	6,25	6,11	6,03	5,96	6,27	6,15

Substrato	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)									
	Evento 3	Evento 9	Evento s/n	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
SC1	835,5	308,4	384,2	562,6	459,2	395,5	394,0	329,3	346,5	368,2
SC2	632,9	204,8	520,3	382,8	324,7	273,6	257,9	213,0	238,8	268,7
SC3	480,4	168,3	347,1	303,3	260,0	217,0	206,5	164,7	193,3	214,9
SC4	659,1	184,6	280,4	295,8	251,1	246,3	225,2	181,8	215,5	237,0
SC5	504,4	151,0	211,4	211,7	188,3	179,5	174,4	142,0	0,0	194,2
SN3	573,9	216,7	334,0	375,1	338,7	227,8	269,2	217,1	232,2	232,7
SN4	473,9	150,6	280,2	272,9	218,5	172,3	185,8	159,2	185,1	202,4
SN5	573,5	179,0	899,2	303,8	290,8	243,4	239,2	207,0	0,0	265,5
SOLO	124,0	43,8	48,0	55,4	53,2	56,6	50,6	49,7	72,5	72,2
SCOM	1760,3	910,0	2257,7	2373,3	2144,0	1784,7	1320,7	1137,0	1239,7	1532,3

Substrato	Fósforo Total (mg,L-1)									
	Evento 3	Evento 9	Evento s/n	Evento 13	Evento 14	Evento 17	Evento 19	Evento 21	Evento 23	Evento 25
SC1	-	-	-	20,247	21,205	19,978	17,673	22,766	18,805	18,658
SC2	-	-	-	21,469	18,993	12,863	16,122	16,310	14,843	16,751
SC3	-	-	-	14,010	13,284	10,588	11,370	10,588	11,615	11,102
SC4	-	-	-	12,030	9,521	9,341	-	13,009	8,974	10,222
SC5	-	-	-	8,003	8,597	11,175	7,706	7,434	7,507	6,333
SN3	-	-	-	10,875	9,917	8,094	9,191	9,781	8,974	8,388
SN4	-	-	-	7,640	7,079	3,913	6,650	9,195	6,554	4,866
SN5	-	-	-	7,838	6,782	5,086	7,112	7,654	6,847	5,306
SOLO	-	-	-	3,218	3,053	3,106	2,954	0,000	0,000	0,000
SCOM	-	-	-	5,726	5,891	5,673	6,419	5,160	6,847	7,654

Apêndice K - Comparação da qualidade da água de escoamento dos substratos em relação a alguns parâmetros de qualidade de água brasileiros

(Continua)

Substrato	Parâmetro	Dados Experimentais (valores mínimos e máximos)	NBR 15.527/2007	Manual ANA/2005*
SC1	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	308,4 – 835,5	-	-
	Cor aparente (μC)	384,2 – 1767,5	15	10
	Fósforo Total (mg.L^{-1})	17,673 – 22,766	-	-
	pH	7,47 – 8,09	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L^{-1})	362,0 – 1595,5	-	-
	Turbidez (NTU)	0 – 2,3	2,0 - 5,0	2
SC2	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	204,8 – 632,9	-	-
	Cor aparente (μC)	321,0 – 4470,0	15	10
	Fósforo Total (mg.L^{-1})	12,863 – 21,469	-	-
	pH	7,09 – 7,74	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L^{-1})	302,0 – 1900,0	-	-
	Turbidez (NTU)	12,3 – 65,2	2,0 - 5,0	2
SC3	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	164,7 – 480,4	-	-
	Cor aparente (μC)	303,3 – 10907,5	15	10
	Fósforo Total (mg.L^{-1})	10,588 – 14,010	-	-
	pH	6,96 – 7,58	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L^{-1})	234,0 – 2072,0	-	-
	Turbidez (NTU)	22,6 – 116,0	2,0 - 5,0	2
SC4	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	181,8 – 659,1	-	-
	Cor aparente (μC)	280,4 – 7715,5	15	10
	Fósforo Total (mg.L^{-1})	8,974 – 13,009	-	-
	pH	7,12 – 7,72	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L^{-1})	359,0 – 2142,5	-	-
	Turbidez (NTU)	27,8 – 112,0	2,0 - 5,0	2
SC5	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	0 – 504,4	-	-
	Cor aparente (μC)	211,4 – 15740	15	10
	Fósforo Total (mg.L^{-1})	6,333 – 11,175	-	-
	pH	6,98 – 7,46	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L^{-1})	305,0 – 2545,0	-	-
	Turbidez (NTU)	36,5 – 103,0	2,0 - 5,0	2
SN3	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	216,7 – 573,9	-	-
	Cor aparente (μC)	334,0 – 3755,0	15	10
	Fósforo Total (mg.L^{-1})	8,094 – 10,875	-	-
	pH	6,98 – 7,65	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L^{-1})	483,0 – 1732,0	-	-
	Turbidez (NTU)	27,0 – 54,0	2,0 - 5,0	2

Apêndice K - Comparação da qualidade da água de escoamento dos substratos em relação a alguns parâmetros de qualidade de água brasileiros

(Conclusão)

Substrato	Parâmetro	Dados Experimentais (valores mínimos e máximos)	NBR 15.527/2007	Manual ANA/2005*
SN4	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	150,6 – 473,9	-	-
	Cor aparente (μC)	272,9 – 2237,5	15	10
	Fósforo Total (mg.L-1)	3,913 – 9,195	-	-
	pH	6,84 – 7,51	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L-1)	317,0 – 2015,0	-	-
	Turbidez (NTU)	11,0 – 66,6	2,0 - 5,0	2
SN5	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	0 – 899,2	-	-
	Cor aparente (μC)	303,8 – 11535,0	15	10
	Fósforo Total (mg.L-1)	5,086 – 7,838	-	-
	pH	7,17 – 7,67	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L-1)	391,0 – 2899,0	-	-
	Turbidez (NTU)	50,4 – 118,0	2,0 - 5,0	2
SOLO	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	43,8 – 124,0	-	-
	Cor aparente (μC)	48,0 – 1020,0	15	10
	Fósforo Total (mg.L-1)	0 – 3,218	-	-
	pH	6,41 – 7,34	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L-1)	47,0 – 724,5	-	-
	Turbidez (NTU)	14,5 – 74,1	2,0 - 5,0	2
SCOM	Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	910,0 – 2373,3	-	-
	Cor aparente (μC)	172,0 – 2373,3	15	10
	Fósforo Total (mg.L-1)	5,160 – 7,654	-	-
	pH	5,96 – 6,65	6,0 - 9,0	6,0 - 9,0
	Sólidos Totais (mg.L-1)	1053,0 – 4641,0	-	-
	Turbidez (NTU)	1,0 – 5,2	2,0 - 5,0	2

* ANA, FIESP & SINCUSCON-SP. Conservação e reúso de água em edificações: Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis: requisitos. Rio de Janeiro, 2005.

Fonte: Elaborado pelo autor.

ANEXOS

Anexo 1 - Laudo de análise química do solo utilizado na composição dos substratos



URI - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões

Pólo de Modernização Tecnológica do Médio Alto Uruguai

Laboratório de Análises de Solos e Tecido Vegetal

Frederico Westphalen - RS Tel (55)3744-9204

Laudo de Análise Química de Solo

(média de duas repetições)

Este Laboratório executa a sua análise duas vezes e calcula a média dos resultados. É mais qualidade a sua disposição!

Produtor (es): Tiago Liberalesso (021.180.900-48).

Endereço: Centro de Tecnologia PPGEAMB

Município: Santa Maria/RS

Empresa: Universidade Federal de Santa Maria

Registro N°: 2017-002/18

Matrícula:

Área (ha):

Amostra: 1

Profundidade (cm): 0-20

Recebimento: 08/02/2017

Expedição: 16/02/2017

Argila %	pH/H ₂ O	Índice SMP	P mg/L	K mg/L	M. O. %
27,0	4,3	5,3	1,8	32,5	1,4

Al cmolc/L	Ca cmolc/L	Mg cmolc/L
2,5	1,1	0,7

(Unidades: mg/L = mg/dm³ (peso / volume); cmolc/L = cmolc/dm³ = me/100 ml; CTC a pH 7,0)

Índice SMP: analisado por TSM (Tampão Santa Maria)

CTC cmolc/L	H + Al cmolc/L	% Sat. da CTC	
		Bases	Al
8,6	6,7	21,9	57,0

Relações		
Ca/Mg	Ca/K	Mg/K
1,6	13,2	8,4

S mg/L	Zn mg/L	Cu mg/L	B mg/L	Mn mg/L	Fe %
13,8	2,6	1,7	0,2	24,0	

Consulte um Engenheiro Agrônomo para obter as recomendações de adubação, calagem e conservação do solo.

Frederico Westphalen - RS, 16 de fevereiro de 2017.

Técnico do Laboratório

Fábio Joel Kochem Mallmann

Eng. Agrônomo CREA/RS 167.665

Responsável Laboratório de Análise de Solos, Plantas e outros Materiais

Validar o laudo em: <http://urinet.fw.uri.br/laudos/> usando a chave: 593A4D078606

REITORIA - Av. Sete de Setembro, 1558 - ERECHIM/RS - Fone/Fax: (054) 322-1255 - CEP 99.700-000 - Cx. Postal 290
CAMPUS DE ERECHIM - Av. Sete de Setembro, 1621 - ERECHIM/RS - Fone: (054) 321-1922 - Fax: (054) 321-1943 - CEP 99.700-000
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN - Av. Assis Brasil, 709 - FREDERICO WESTPHALEN/RS - Fone: (055) 3744-9200 - Fax: (055) 3744-9265 - CEP 98.400-000
CAMPUS DE SANTO ÂNGELO - Av. Universidade das Missões, 393 - SANTO ÂNGELO/RS - Fone: (055) 313-1400 - Fax: (055) 313-1400 - CEP 98.802-470
CAMPUS DE SANTIAGO - Rua Vinte de Setembro, 2410 - SANTIAGO/RS - Fone: (055) 251-1715 - Fax: (055) 251-1214 - CEP 97.700-000
EXTENSÃO DE CERRO LARGO - Rua Dalno Filho, 772 - CERRO LARGO/RS - Fone/Fax: (055) 359-1613 - CEP 97.900-000
EXTENSÃO DE SÃO LUIZ GONZAGA - Rua José Bonifácio, 3149 - SÃO LUIZ GONZAGA/RS - Fone: (055) 352-1886 - CEP 97.800-000